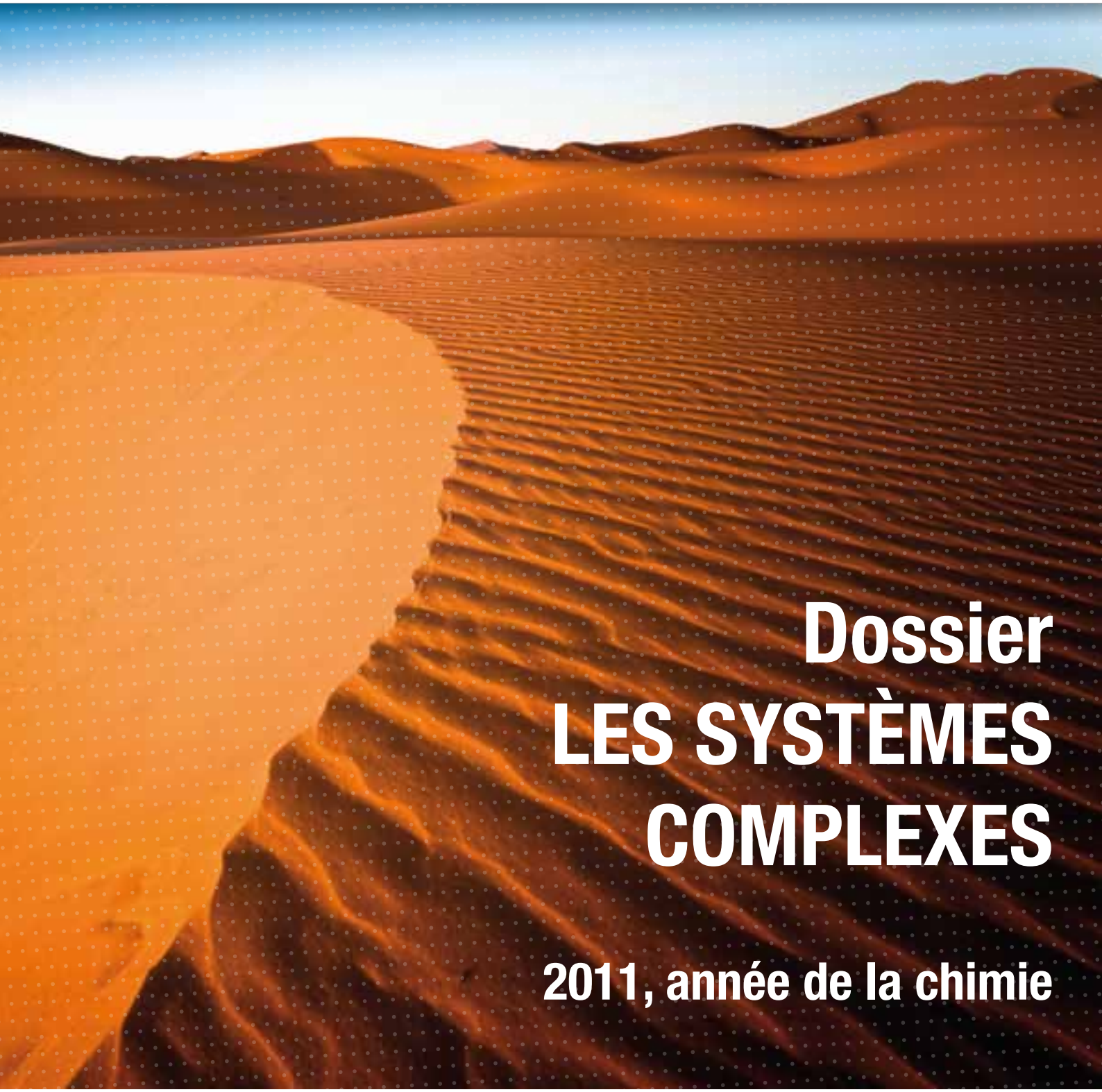
élément 05

LE MAGAZINE DE L'UNIVERSITÉ DE MONS

MARS 11



Dossier
LES SYSTÈMES COMPLEXES

2011, année de la chimie

Venez voir tourner la Terre
LE PENDULE DE FOUCAULT À SAINTE-WAUDRU !

UMONS
Université de Mons

UMONS
Université de Mons

Editeur Responsable
Pr C. Conti, Recteur

Rédacteurs en chef
Pascal Damman
pascal.damman@umons.ac.be

Valéry Saintghislain
valery.saintghislain@umons.ac.be

Tom Mens
tom.mens@umons.ac.be

Maquette & Production
Ex Nihilo
www.exnihilo.be
Contact : Luc Vandensteene
T. : 065 62 25 58
M. : 0475 96 12 42

Toute remarque, question, suggestion peut être adressée à valery.saintghislain@umons.ac.be

SOMMAIRE

ÉDITORIAL 3

LE RETOUR DU PENDULE DE FOUCAULT À SAINTE-WAUDRU 4

LES SYTÈMES COMPLEXES 8

Emergence de la complexité

- Le chaos linéaire : un paradoxe ? 10
- L'Elastica, de Leonhard Euler à nos jours ! Comment utiliser les forces mécaniques pour générer des formes complexes 12
- Complexité et émergence dans l'étude du langage 16
- Complexité du langage et récursion 20
- Le chaos et la synchronisation dans les systèmes dynamiques non-linéaires : application aux lasers 23

L'ordinateur à la rescousse

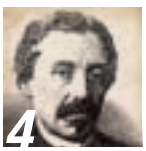
- Complexité des données et compression informatique 26
- L'ordinateur au cœur de la découverte mathématique 29
- Non, les ordinateurs ne seront jamais tout-puissants ! 32

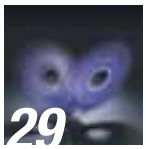
Modélisation de systèmes complexes

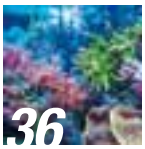
- Les récifs coralliens : des écosystèmes complexes à l'avenir incertain 36
- Résilience et mixité urbaine : une réponse à la complexité de la ville 40
- Le système éducatif : un système complexe que l'on peut modéliser 43
- La complexité logicielle 46

MATERIA NOVA ET MULTITEL : déjà 10 ans à la pointe de la recherche 48

2011, ANNÉE INTERNATIONALE DE LA CHIMIE 52







#5

ÉDITORIAL

Quel est le rapport entre les agglomérations urbaines, les récifs coralliens, les systèmes logiciels ou les flux d'élèves entre les écoles ? Dans chacun de ces cas, il s'agit de systèmes complexes, mettant en jeu des composantes qui s'entremêlent et interagissent entre elles d'une façon telle que les modèles mathématiques traditionnels s'avèrent impuissants pour les décrire.

Le dossier central de ce nouveau numéro de la revue « Elément » est consacré à ce type de systèmes dits complexes. Il concrétise un bel exemple de multidisciplinarité autour d'une thématique de recherche impliquant des contributions émanant de divers services de plusieurs Facultés de l'UMONS.

La complexité est un terme ambigu ne correspondant à aucune définition exacte et unique. Elle revêt toutefois un ensemble de significations qui se déclinent selon le domaine scientifique auquel elles s'appliquent. Utilisé souvent de façon intuitive dans le langage courant, le sens qu'on lui donne est, malgré tout, en bon accord avec cette approche, généralement lorsqu'il semble qu'il n'y ait pas moyen d'anticiper l'avenir, de prévoir ce qui va se passer à partir des éléments dont on dispose.

L'héritage de la pensée platonicienne a pu faire croire un moment que tout phénomène pouvait être considéré comme fondamentalement ordonné, avec des lois dictant son fonctionnement et lui imposant un ordre qui le rendait compréhensible et prévisible.

Le monde réel se révèle toutefois tout autre, avec des systèmes intrinsèquement non réductibles et non séparables, du moins à partir des moyens dont on dispose à un moment donné. Ces dernières décennies, les outils mathématiques ont évolué, les moyens informatiques se sont développés de façon spectaculaire avec pour corollaire, la mise à disposition de moyens de calcul entrebâillant la porte à l'étude de phénomènes pour lesquels la modélisation mathématique était auparavant inadaptée pour les simuler.

L'étude des systèmes complexes se pose donc comme un des défis du 21e siècle, dont la règle est l'interdisciplinarité et qui peut concerner tout autant des physiciens, des ingénieurs, des économistes, des informaticiens, des biologistes, des philosophes, des linguistes, des mathématiciens, des médecins, etc.

Au sein de la nouvelle Université de Mons, la modélisation des systèmes complexes est devenue en 2010 l'un des axes fédérateurs du domaine des sciences. Suite à la fusion de l'UMH (Université de Mons-Hainaut) et de la FPMs (Faculté Polytechnique Mons), la structure renforcée des activités de recherche s'articule aujourd'hui autour de trois secteurs qui représentent les orientations majeures de l'université dans les sciences humaines, les sciences de la santé et de la vie et les sciences et technologies. Ces secteurs se subdivisent en domaines couvrant les champs de recherche des facultés de l'UMONS. Ces dernières organisent leur stratégie de recherche autour d'axes thématiques fédérateurs.

Ce 5e numéro d' « Elément » vous donne un aperçu des travaux de certains laboratoires qui collaborent au sein de l'axe Modélisation des systèmes complexes. Il évoque également la commémoration des 10 années d'existence des centres de recherche Materia Nova et Multitel, créés au départ des activités de recherche de notre université. Il annonce aussi l'installation prochaine par l'UMONS, d'un pendule de Foucault à l'intérieur de la Collégiale Sainte Waudru à Mons. Et dévoile le programme des activités organisées par l'Institution dans le cadre de l'année de la chimie.

Je vous en souhaite bonne lecture.

Calogero Conti,
Recteur de l'UMONS

Venez voir la terre tourner

Le retour du pendule de Foucault à Sainte-Waudru !

Imaginez une nef gothique vertigineuse, un lieu pluriséculaire chargé d'histoire. Une sphère métallique, suspendue à la voûte par un long câble d'acier, fend l'air froid, lentement, dans un majestueux mouvement quasi hypnotique de va-et-vient, dans le plus grand des silences, comme pour mieux respecter le caractère sacré du lieu. Et, en quelques instants, telle une révélation, la rotation de notre monde, la Terre, devient une évidence.

Parmi tous les événements organisés par le Carré des Sciences, il en est un qui surpasse tous les autres par l'atmosphère très particulière – voire magique – qui s'en dégage.
Cet événement a en effet tout pour faire rêver : une question vieille comme le monde, un lieu prestigieux hors du temps, une expérience mythique, spectaculaire et troublante de simplicité.

Ici, pas d'électronique, pas même d'électricité. Juste une sphère de métal suspendue à un câble et la beauté élégante du mouvement. Mais un mouvement qui nous révèle la rotation de notre Terre, et qui nous conduit de façon inattendue aux portes de la cosmologie.

Vous l'aurez deviné, c'est du pendule de Foucault dont il s'agit, celui de l'Université, installé dans la collégiale Sainte-Waudru à Mons.

L'origine du pendule de l'UMONS

Rêvé par les physiciens de l'Université, réalisé de main de maître en 2005 par Jean-Pierre Toubeau et Jean Minez, techniciens hors pair de la Faculté de Médecine et Pharmacie et de la Faculté des Sciences, le pendule de Foucault est de retour dans la collégiale !

C'est lors de l'été 2010 que la décision de relancer le pendule est prise. Immédiatement, un vent de joie souffle sur les physiciens de l'UMONS. Les premières oscillations de 2005 ont en effet laissé un souvenir extraordinaire à tous ceux qui ont eu la chance de participer à l'aventure. Quant aux plus jeunes, ils sont heureux de voir enfin ce fameux pendule dont ils entendent parler depuis des années.

L'histoire commence en 2004. Les physiciens de l'Université se réunissent pour définir le programme de 2005, *Année internationale de la Physique*. Les propositions d'activités fusent de toute part. Cependant, une idée, aussi brillante qu'audacieuse, est émise par deux jeunes chercheurs : pourquoi ne pas reproduire à Mons la célèbre expérience du pendule de Foucault ?

À expérience exceptionnelle, écrin exceptionnel : tous les regards convergent alors vers la magnifique collégiale Sainte-Waudru, chef d'œuvre du gothique brabançon, dont la construction a commencé au XV^{e} siècle par la volonté des Chanoinesses. La Fabrique d'Église accepte avec enthousiasme de nous accueillir et nous ouvre les portes de la Collégiale.

La campagne de construction et d'installation du pendule se mue en une fascinante découverte de l'édifice : nous avons le privilège de monter aux combles, situés à plus de vingt-cinq mètres au-dessus du sol, en empruntant d'extraordinaires escaliers médiévaux en colimaçon, ou encore en passant par le très étroit triforium, qui offre une vue époustouflante sur la nef et le Car d'Or.

La suspension du pendule, imaginée et réalisée par Jean-Pierre et Jean, prend forme dans les labos et ateliers de la Plaine de Nimy. L'heure est venue de tout installer dans les combles : pas question d'oublier le moindre tournevis en bas ! La montée du matériel n'est pas simple : il faut transporter de longues poutres de bois et les accès sont plus qu'étriqués.

Les premiers tests in situ se révèlent immédiatement concluants, confortant les remarquables intuitions et solutions envisagées par nos deux techniciens ; et c'est là l'un des aspects les plus impressionnants de cette aventure.[1]

L'engouement du public et des médias est exceptionnel. Plus de 3.500 visiteurs, en à peine deux semaines, participent aux visites guidées. Certaines personnes font même le déplacement depuis le Luxembourg pour venir voir l'expérience. Le retour médiatique est inouï. Nous nous faisons même réprimander par certains qui nous reprochent de démonter le pendule trop tôt !

Nous nous promettons de revenir un jour voir la Terre tourner. Promesse tenue !

VOIR LA TERRE TOURNER ?

Mais finalement, un pendule de Foucault, à quoi ça sert ?

Ce pendule fait partie des quelques rares expériences qui permettent de prouver que notre Terre tourne sur elle-même. Depuis leur plus jeune âge en effet, les enfants apprennent comme une vérité révélée que la Terre tourne sur elle-même en 24 h[2] et qu'elle boucle une révolution autour du Soleil en un peu plus de 365 jours. Tout le monde en est sûr. Bien sot en effet celui qui remettrait en question ce savoir a priori élémentaire ! Il n'est d'ailleurs pas rare d'entendre certaines voix se moquer de la naïveté des Anciens, convaincus que la Terre était immobile au centre de l'Univers ! Et pourtant…

Le problème est loin d'être simple. S'il l'avait été, Galilée n'aurait pas connu tant de déboires avec l'Inquisition et le modèle planétaire de Ptolémée n'aurait pas été utilisé pendant près de quinze siècles par les esprits les plus brillants de leur temps.

Certes, nous avons l'impression que notre Terre est immobile, car nous ne sentons pas physiquement que nous tournons. Après tout, lorsqu'enfant, nous nous installions sur un de ces manèges de foire, nous pouvions ressentir même les yeux fermés que nous tournions ! Mais sur notre *Terre ferme*, rien de tout cela. Nous voyons juste les astres tourner autour de nous, c'est tout. Il est donc parfaitement naturel de croire que nous vivons sur un monde immobile, et que tout tourne autour de nous. Et pourquoi pas finalement ?

Deux millénaires d'observations rigoureuses, les intuitions de Copernic, les observations de Galilée, la minutie de Kepler et le génie de Newton seront nécessaires pour enfin lever le voile sur les rouages secrets de la mécanique céleste.

À l'époque de Léon Foucault (1819-1868), la réalité d'une Terre en rotation sur elle-même, en orbite autour du Soleil, ne fait plus l'ombre d'un doute. Mais il n'en existe encore aucune preuve directe. C'est là qu'intervient le physicien français. Expérimentateur de génie, il relève le défi grâce à une extraordinaire intuition : un pendule devrait permettre de contourner tous les obstacles[3] qui avaient conduit ses prédécesseurs à l'échec… Sa maîtrise technique fait le reste. Son pendule le fait passer à la postérité.

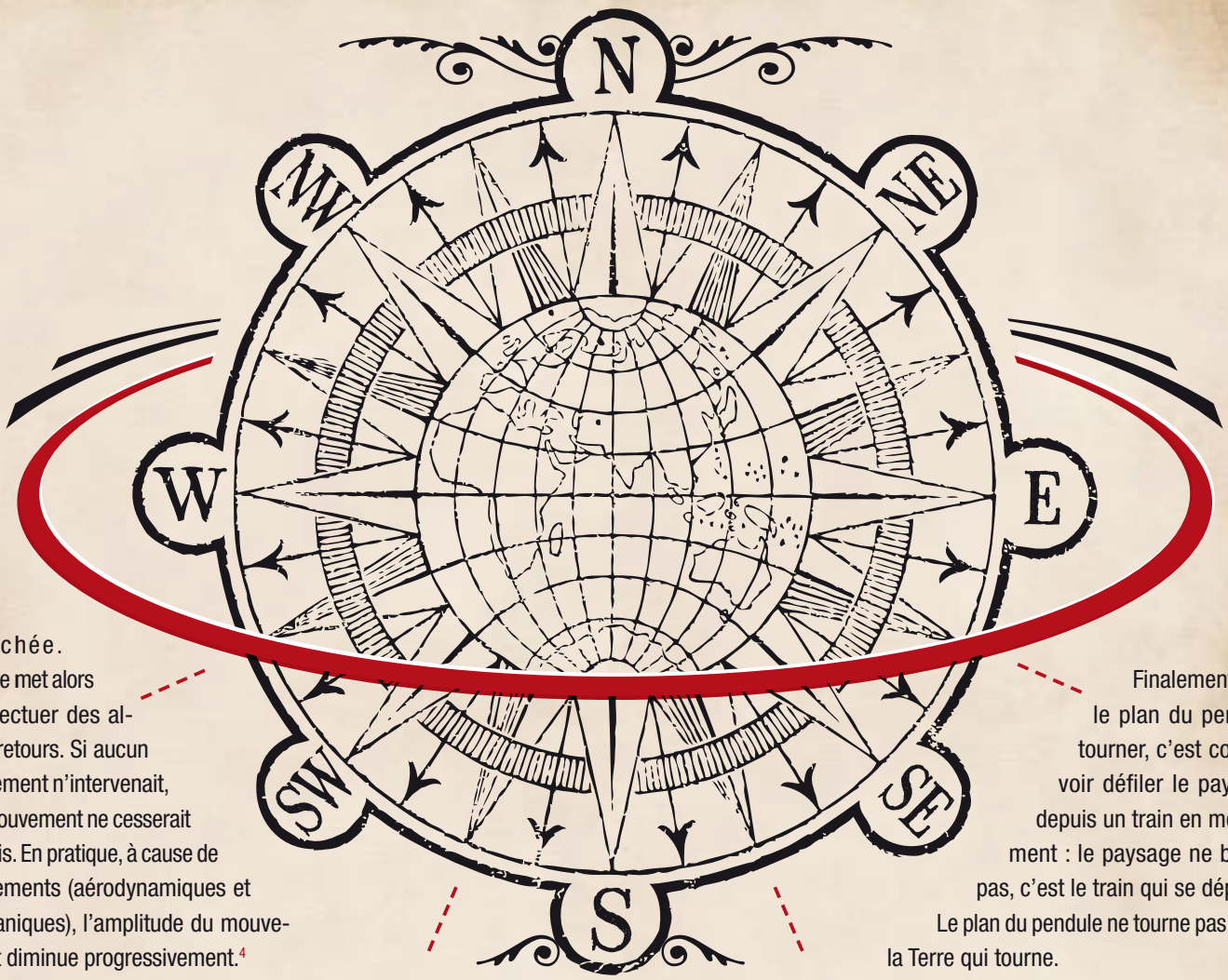
LE PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE

Pour comprendre aisément l'expérience de Foucault, il faut imaginer la réaliser exactement au pôle Nord (ou Sud). Une sphère massive est suspendue à un câble. Elle est ensuite déplacée de son point d'équilibre, avant d'être délicatement

[1] Pour en savoir plus sur les solutions techniques spécifiquement développées pour le pendule de l'UMONS, rendez-vous à la collégiale lors des visites guidées ! Un article sur les coulisses du pendule de Sainte-Waudru sera également publié dans le livret de l'exposition.

[2] En réalité, par rapport aux étoiles, la Terre boucle une rotation sur elle-même en 23 h 56 min.

[3] Voir livret de l'exposition.



relâchée.
Elle se met alors à effectuer des allers-retours. Si aucun frottement n'intervenait, ce mouvement ne cesserait jamais. En pratique, à cause de frottements (aérodynamiques et mécaniques), l'amplitude du mouvement diminue progressivement.[4]

Finalement, voir le plan du pendule tourner, c'est comme voir défiler le paysage depuis un train en mouvement : le paysage ne bouge pas, c'est le train qui se déplace. Le plan du pendule ne tourne pas, c'est la Terre qui tourne.

Mais le plus troublant, c'est qu'un observateur au sol qui observe le pendule voit le plan d'oscillation tourner lentement, comme si, lors de son mouvement, la sphère était en permanence très légèrement déviée vers la droite. Vingt-quatre heures sont nécessaires pour que ce plan retrouve son orientation initiale. Autrement dit, si le pendule au Pôle est lâché initialement dans la direction d'une étoile, il continue à osciller à chaque instant dans la direction de l'étoile, en dépit du mouvement diurne de la voûte céleste ! Or, rien dans la mécanique du pendule ne peut expliquer la rotation de son plan d'oscillation !

Ce résultat étonnant est lié à une propriété très curieuse des pendules. Si l'on dispose un petit pendule avec son support sur un tabouret tournant, et qu'on lance le pendule dans une direction donnée, le fait de faire tourner ou non le tabouret sur lui-même ne modifiera en rien le mouvement du pendule ! Autrement dit, le plan d'oscillation d'un pendule est insensible à la rotation de son point de suspension. Un lutin debout sur le tabouret tournant verrait le plan du petit pendule tourner, alors qu'en fait, c'est lui et le tabouret qui tournent !

Retournons au Pôle en gardant à l'esprit cette idée : si nous identifions le tabouret tournant à la Terre, le petit pendule au pendule de Foucault, et le lutin à l'observateur, tout s'éclaircit. La Terre tourne sur elle-même en emportant avec elle l'observateur. Mais, tout comme le petit pendule sur le tabouret en rotation, le plan du pendule de Foucault au Pôle n'est pas affecté par la rotation de la Terre : il reste fixe par rapport aux étoiles lointaines !

Les choses se compliquent si l'expérience n'est pas réalisée aux pôles. Ainsi, à notre latitude, le plan d'oscillation du pendule de Foucault ne tourne pas en 24 mais bien en un peu plus de 31 heures. Au Caire, cette période est de 48 heures. La période de rotation du plan du pendule dépend en effet de la latitude… Ce résultat n'est pas très intuitif, mais peut s'expliquer de différentes façons : rendez-vous à la collégiale pour en discuter !

Quoi qu'il en soit, Foucault lui-même n'était pas satisfait de cette dépendance vis-à-vis de la latitude, qui semble brouiller un peu les cartes : tout a l'air si simple aux pôles, et apparemment si complexe ailleurs !

Il se lance alors dans la réalisation d'une nouvelle expérience qui montrera clairement la

[4] Fait étonnant, la durée d'un aller-retour reste cependant la même tout au long du mouvement ; elle ne dépend que de la longueur du fil !

[5] Le principe du gyroscope est basé sur le fait qu'un objet en rotation, si on ne vient pas le perturber au cours de son mouvement, a tendance à conserver la direction de son axe de rotation. Une démonstration sera réalisée dans le cadre de l'événement à la collégiale.

[6] Le pendule de Foucault de l'UMONS est long de 25 mètres ; la masse de la sphère est de 42 kg, pour un diamètre de 22 cm.

rotation de la Terre, quel que soit l'endroit où elle sera réalisée. Et c'est là qu'il frappe encore un grand coup : Foucault invente le premier gyroscope[5], qui permettra bien plus tard de s'orienter sur les mers et dans les airs avec une redoutable efficacité.

L'ÉVÉNEMENT À LA COLLÉGIALE SAINTE-WAUDRU

À Sainte-Waudru, le pendule de Foucault[6] ne sera bien entendu pas la seule expérience proposée : des manipulations introductives – parfois spectaculaires – seront également réalisées. Les visiteurs pourront par exemple prendre place sur un petit manège qui leur permettra de prendre conscience des effets de la rotation sur notre perception du mouvement. Quelques-uns des rares moyens de prouver que la Terre tourne sur elle-même seront présentés, comme le gyroscope déjà cité, où l'étonnant compas gyroscopique fabriqué par nos collègues de la Faculté Polytechnique.

Des questions connexes à celle de la rotation de la planète seront aussi abordées : que se passerait-il si la Terre tournait beaucoup plus vite sur elle-même ? Ou si, au contraire, elle ne tournait plus ? Et bien entendu, nous ne manquerons pas de parler du crucial problème du sens de rotation des tourbillons qui se forment dans les éviers qui se vident !

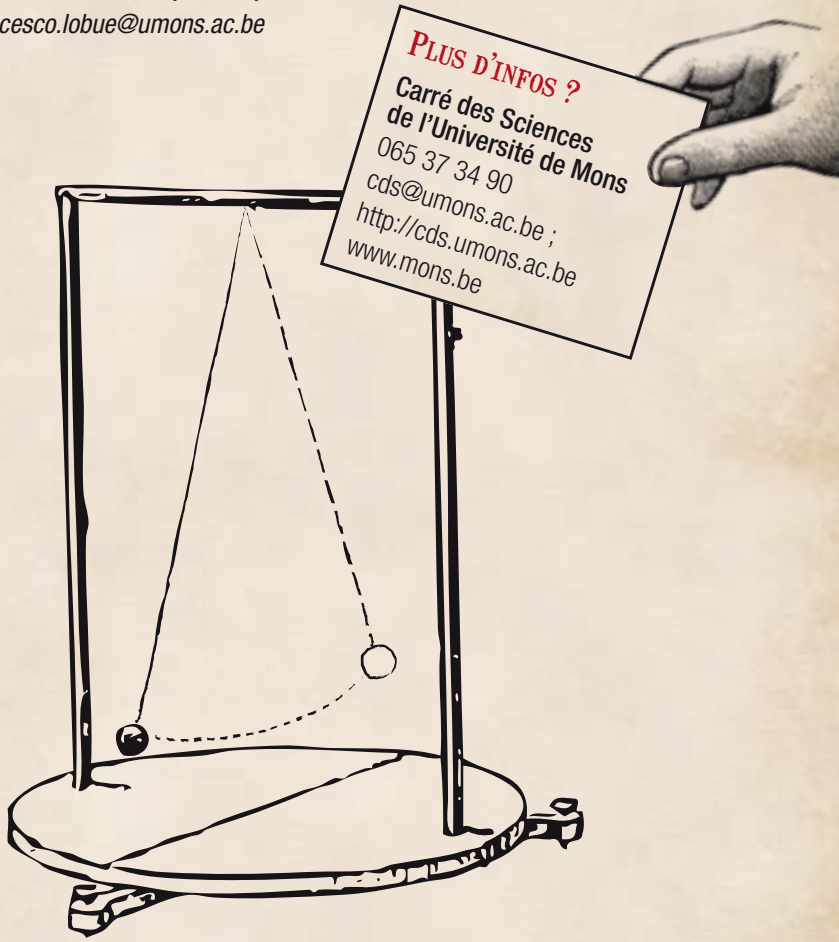
Des visites guidées peuvent être organisées en semaine pour les classes du secondaire supérieur, sur réservation uniquement. Des visites pour le grand public auront lieu tous les dimanches, sans réservation, à 14 h et 15 h. Des visites supplémentaires sont également au programme du week-end du Printemps des Sciences, les 2 et 3 avril 2011. Toutes les visites sont gratuites.

DEUX CONFÉRENCES

En marge de l'exposition, deux conférences sont proposées à l'Université. La première sera présentée le mercredi 2 mars 2011 à 20 h par Pierre Gillis, physicien, Professeur à l'UMONS. Elle traitera de Léon Foucault et de son pendule. La seconde conférence sera présentée par Véronique Dehant, spécialiste de géodésie à l'Observatoire Royal de Belgique et Professeur à l'UCL, le mercredi 23 mars 2011. Elle répondra à cette question étonnante : que peut bien nous apporter aujourd'hui l'étude de la rotation de la Terre et des autres planètes telluriques ?

Vous l'aurez donc compris, c'est à un événement rare que nous vous convions. *Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre.*

Francesco Lo Bue (UMONS)
francesco.lobue@umons.ac.be



PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE DU PENDULE DE FOUCAULT

LES SYSTÈMES

» **Tom MENS,** Institut d'Informatique, FS
tom.mens@umons.ac.be

La notion de complexité est apparue sous différentes formes à la fin du 19e siècle et au début du 20e siècle. Citons entre autres l'étude du problème des trois corps (terre, lune et soleil) par Henri Poincaré et les travaux de Edward Lorenz dans le cadre de la météorologie. Cependant, l'étude des *systèmes complexes* n'est devenue un domaine de recherche à part entière que récemment. L'obtention de nouveaux résultats permettant le développement de nouveaux concepts s'est fortement accélérée au cours du 20e siècle grâce à la croissance rapide des moyens de calcul informatique depuis la seconde guerre mondiale.

L'étude des systèmes complexes est un sujet de recherche essentiellement multidisciplinaire. La complexité peut en effet se manifester sous différentes formes : systèmes physiques, urbains, vivants, sociologiques, économiques, théoriques, informatiques, etc. Les travaux de recherche actuels se focalisent sur des notions telles que l'émergence de propriétés collectives, le comportement chaotique, l'auto-organisation, la redondance, la récursion, ...

Du fait de cette diversité, à la fois au niveau des applications possibles, des concepts étudiés et des outils utilisés, la recherche sur les systèmes complexes est menée par un grand nombre de chercheurs de l'Université de Mons, provenant de différentes Facultés : la *Faculté des Sciences Appliquées*, la *Faculté d'Architecture et d'Urbanisme*, la *Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education*, l'*Institut des Sciences du Langage* et la *Faculté des Sciences*. Au sein de cette dernière Faculté, la modélisation des systèmes complexes occupe une place primordiale. Elle est un des axes stratégiques autour desquels la recherche en Sciences est structurée.[1] Plus de 15 laboratoires sont impliqués dans ce domaine depuis l'étude expérimentale de systèmes biologiques, chimiques et physiques jusqu'à l'élaboration de nouveaux modèles mathématiques et la mise au point d'outils informatiques.

COMPLEXES

Dans ce dossier, vous découvrirez des contributions de chercheurs de l'UMONS. Pour faciliter sa lecture, nous avons choisi de le structurer selon trois catégories :

Dans **« Emergence de la complexité »**, vous verrez comment des mécanismes, pourtant simples à la base, peuvent donner naissance à une complexité *émergente*. Un exemple typique est l'introduction du chaos dans les systèmes dynamiques, qu'ils soient mathématiques, mécaniques, optiques ou langagiers. Ces aspects rejoignent l'apparition des formes complexes dans la nature (la morphogenèse) par un processus d'émergence.

« L'ordinateur à la rescousse » rassemble des contributions exposant comment l'ordinateur et l'informatique facilitent l'étude des systèmes complexes pour lesquels les outils mathématiques étaient auparavant impossibles à modéliser. Cependant, les ordinateurs ne seront jamais tout-puissants. Des limites intrinsèques empêcheront toujours la résolution de certains problèmes.

La troisième section, **« Modélisation des systèmes complexes »**, décrit quelques applications concrètes de l'étude des systèmes complexes par les chercheurs de l'UMONS dans des domaines très divers. Les agglomérations urbaines sont étudiées comme des entités polymorphes complexes, multi-échelles, et dynamiques. Les récifs coralliens tropicaux, et plus spécifiquement les interactions entre les coraux, les algues et les oursins, constituent des écosystèmes complexes qui sont impactés par l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Les flux d'élèves entre écoles constituent un autre exemple d'un système complexe nécessitant le recours à des modélisations par ordinateur. Finalement, les systèmes logiciels, forment des écosystèmes rendus complexes par l'interaction entre le processus de développement, le produit logiciel, et les humains, développeurs ou utilisateurs de ce logiciel.

Nous vous souhaitons une agréable lecture et espérons que ce numéro d'Elément, présentant un large éventail d'approches et points de vue sur la modélisation et la compréhension des systèmes complexes et dynamiques, aura répondu aux questions que vous vous posiez. Ou qu'il vous aura donné l'envie d'en savoir encore plus sur ce sujet passionnant, diversifié et … complexe.

Lecture recommandée:

- « *La Théorie du chaos : Vers une nouvelle science* », James Gleick et Christian Jeanmougin, Mass Market Paperback (1999)
- « *The self-made Tapestry, pattern formation in Nature* », Philip Ball, Oxford University Press (1999)
- « *Complexity, A guided Tour* » Melanie Mitchell, Oxford University Press (2009)
- « *Simply Complexity: A Clear Guide to Complexity Theory* », Neil Johnson, Oneworld Publications (2009)
- « *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software* », Steven Johnson, Scribner (2002)

[1] La brochure de « La Recherche à l'UMONS » peut être téléchargée à partir du site web http://www.umons.ac.be

Le chaos linéaire : un paradoxe ?

» **Karl GROSSE-ERDMANN**, **Quentin MENET**, Service de Probabilités et Statistique
kg.grosse-erdmann@umons.ac.be

Selon un avis répandu, le chaos ne pourrait apparaître que dans un système non-linéaire. Pourtant, le chaos linéaire existe bel et bien. L'ignorance de ce phénomène s'explique en fait facilement...

L'effet papillon

Depuis la fin du 19ème siècle, les mathématiciens se sont efforcés de comprendre la nature du chaos. Un phénomène souvent rattaché à cette notion porte le nom d'effet papillon : le simple battement d'ailes d'un papillon au Brésil pourrait causer une tornade au Texas. Autrement dit, une perturbation minime pourrait avoir à long terme des conséquences réellement significatives. En mathématique, on parle de la sensibilité aux conditions initiales.

Une autre caractéristique du chaos réside en l'existence de conditions initiales conduisant à n'importe quelle configuration du système: une navette spatiale partant d'un endroit privilégié finirait par visiter chaque recoin de l'espace. Dans le jargon mathématique, sa trajectoire porterait le nom d'orbite dense.

Une orbite périodique: celle de la comète de Halley

Le chaos en mathématique

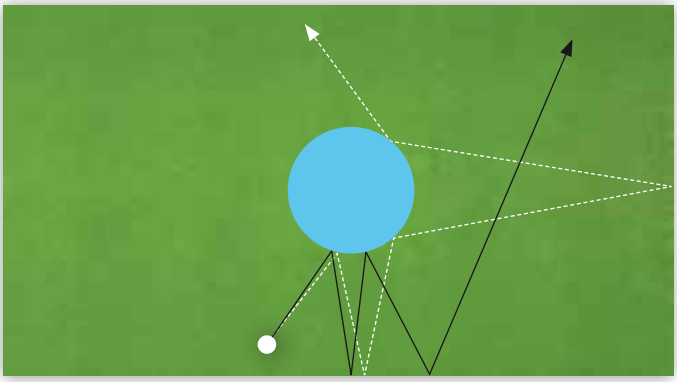
En 1986, le mathématicien américain R. Devaney a proposé une définition du chaos qui, à première vue, impose des conditions très fortes. Selon lui, un système dynamique est chaotique s'il vérifie, à la fois, les trois propriétés suivantes:

- la sensibilité aux conditions initiales,
- l'existence d'une orbite dense,
- le passage, près de chaque point, d'une orbite périodique.

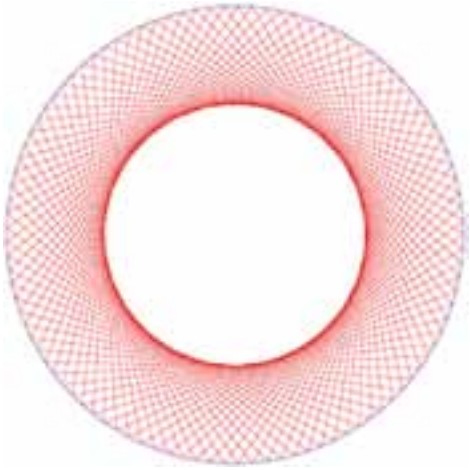
Les deux dernières conditions entraînent qu'on retrouve une orbite dense et une orbite périodique près de chaque point.

Un exemple simple

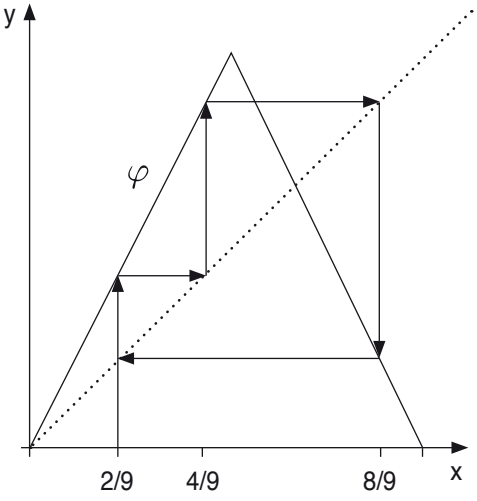
Les conditions de Devaney sont-elles trop fortes? Au contraire, elles sont vérifiées par un système aussi simple que celui décrit par la fonction $\phi(x)=1-|2x-1|$ avec $0 \leq x \leq 1$. Il est facile de trouver des orbites périodiques pour ce système. L'état initial $x_0 = 2/9$, par exemple, est envoyé sur $x_1 = \phi(2/9)=4/9$, puis sur $x_2=\phi(4/9)=8/9$ avant de retourner à $x_3=\phi(8/9)=2/9$. Ce point x_0 a donc une orbite périodique de période 3.



La sensibilité aux conditions initiales : une table de billard avec un obstacle



Une orbite dense dans un anneau



Exemple d'une orbite périodique de période 3

Par ailleurs, les valeurs dans le tableau ci-dessous illustrent bien la sensibilité aux conditions initiales pour ce système.

x_0	0.16	0.17
x_1	0.32	0.34
x_2	0.64	0.68
x_3	0.72	0.64
x_4	0.56	0.72
x_5	0.88	0.56
x_6	0.24	0.88

La définition de Devaney ne semble donc pas être trop forte pour les systèmes non-linéaires.

L'existence du chaos linéaire

En 1991, G. Godefroy et J. H. Shapiro ont proposé d'accepter la définition du chaos au sens de Devaney même pour les systèmes linéaires. Ils avaient en fait alors à l'esprit un vieux résultat de G. R. MacLane datant de 1952, presque oublié, qui dit que l'opérateur linéaire de dérivation des fonctions possède une orbite dense. Cela signifie qu'il existe une fonction f telle que pour n'importe quelle autre fonction g, il y a une dérivée n-ième de f qui approche g uniformément sur n'importe quel intervalle borné. Des points périodiques de ce système sont bien connus : la fonction sinus est par exemple un point de période 4. En étudiant plus en profondeur l'opérateur de dérivation, Godefroy et Shapiro ont réussi à montrer que celui-ci est chaotique au sens de Devaney.

Le chaos linéaire existe donc bel et bien.

Étonnamment, il n'est même pas nécessaire de construire des opérateurs d'une grande complexité pour observer ce phénomène.

D'où provient l'ignorance du chaos linéaire?

Imposer la linéarité à un système constitue malgré tout une restriction importante : le chaos linéaire ne peut être observé que pour des systèmes portant sur des espaces de dimension infinie comme, par exemple, l'espace de toutes les fonctions indéfiniment dérivables. C'est sans doute cette absence du chaos linéaire en dimension finie qui est à la base de sa méconnaissance. Néanmoins, dès que cette barrière est franchie, tout est possible. Un résultat de N. Feldman datant de 2001 montre qu'un système linéaire de dimension infinie peut adopter n'importe quel comportement irrégulier observé pour un système non-linéaire de dimension finie.

Une théorie en pleine expansion…

Le travail de Godefroy et Shapiro a été un véritable déclencheur pour la recherche sur le chaos linéaire. De nos jours, de nombreuses équipes un peu partout dans le monde étudient ce phénomène. En 2004, deux jeunes mathématiciens français, S. Grivaux et F. Bayart, ont observé un comportement inouï : il existe des orbites, appelées fréquemment récurrentes, qui sont denses et montrent pourtant un fort aspect de périodicité. Plus précisément, si on regarde n'importe quel point de l'espace, il existe un temps T tel que l'orbite passe près de ce point au moins une fois avant l'instant T, au moins deux fois avant l'instant 2T et ainsi de suite. Essayez un peu d'imaginer le comportement d'une navette dans notre univers si sa trajectoire vérifiait une telle propriété !

… et des questions toujours ouvertes.

Alors qu'un tel comportement n'avait même pas été observé auparavant pour un système non-linéaire, Grivaux et Bayart ont montré que l'opérateur de dérivation possède une orbite fréquemment récurrente. Il semble dès lors naturel de se demander si chaque système chaotique possède une telle orbite. Cependant, à l'heure actuelle, personne ne connaît la réponse à cette question. Le chaos linéaire est loin de nous avoir livré tous ses secrets. ■

L'Elastica, de Leonhard Euler à nos jours !

Comment utiliser les forces mécaniques pour générer des formes complexes.

» **Pascal DAMMAN, Fabian BRAU, Hugues VANDEPARRE**, Laboratoire Interfaces & Fluides Complexes
pascal.damman@umons.ac.be

Les formes complexes que l'on peut observer dans la Nature sont parfois bien intrigantes et nous conduisent, à tort, à y voir la main de l'Homme. Dans cet article, en nous basant sur notre expérience des instabilités élastiques, nous montrons que des processus physiques assez simples et banals peuvent faire apparaître la complexité par un processus d'émergence.

Certains problèmes scientifiques possèdent une longévité remarquable, parfois pour leur difficulté, par exemple la conjecture de Kepler ou le théorème de Fermat, parfois pour leur exceptionnelle fécondité. Le problème de l'Elastica tombe clairement dans cette seconde catégorie. L'Elastica — un mot latin décrivant une mince bande élastique — constitue un problème initialement posé par Galilée en 1638 : quelle est la forme adoptée par une tige flexible, comme une poutre ou une lame de métal, soumise à l'action de forces à ses extrémités (Figure 1). Ce problème en relation étroite avec celui de la caténaire — une courbe décrivant la forme d'une corde, d'un collier suspendu — a été généralisé par Jacques Bernouilli (1690) puis par Leonhard Euler (1740).

Les solutions de ce problème, faisant partie de la famille des problèmes isopérimétriques, combinant physique et mathématique, constituent une famille de courbes remarquables, également appelées Elastica ou courbes élastiques, sur laquelle ont planché les plus brillants esprits du 17e et du 18e siècle comme Huygens, Newton, Leibniz, Jacques et Daniel Bernouilli, Euler, Lagrange ... et bien d'autres, dont, d'une manière inattendue, Max Born, un des fondateurs de la mécanique quantique (il consacra sa thèse de doctorat, publiée en 1906, à l'Elastica).

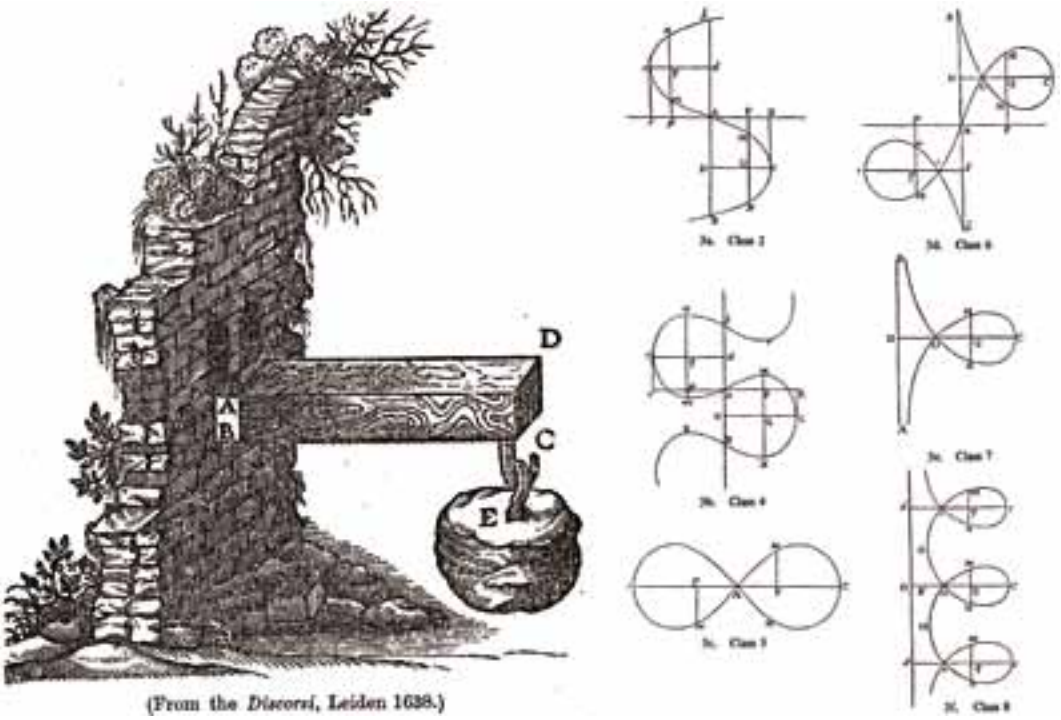


Fig. 1 : Gravures extraites des « Discorsi » de Galilée (gauche) et du « Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici lattissimo sensu accepti » de Euler (droite).

La résolution de ce problème, somme toute assez simple à formuler, a participé au développement de nombreux outils fondamentaux encore largement utilisés de nos jours : la théorie de l'élasticité des matériaux, la notion de courbure, le calcul différentiel, le calcul des variations, les intégrales elliptiques, le flambage (la stabilité des structures élastiques) et la théorie des bifurcations. Toutes ces notions sont en effet indispensables pour résoudre complètement ce problème. Leur lente maturation permet de comprendre pourquoi il a fallu plus d'une centaine d'années pour y parvenir. C'est Euler, en 1744, qui apporta la solution définitive de l'Elastica dans un addendum de son article sur le calcul variationnel. Il représenta et classa les différentes courbes possibles (sans ordinateur !) dans son article (Figure 1). Elles possèdent toutes la même équation générique (c.à.d. elles sont solutions de la même équation différentielle) et ont été encore étudiées bien longtemps après leur découverte initiale.

Vous pouvez très facilement reproduire un Elastica chez vous : prenez une feuille mince d'un matériau solide (l'idéal est une feuille de papier ou une fine lame en acier) posée sur une table et essayez de la comprimer de façon à ce qu'elle reste plane. Vous n'y parviendrez pas, la feuille se courbe systématiquement sur toute sa longueur. C'est ce qu'on appelle le flambage. En effet, au-delà d'une force critique appliquée à la feuille, il est énergétiquement plus favorable de se courber au lieu de continuer à se comprimer. Cette instabilité de flambage est une parfaite illustration d'un processus devenu courant en science, une bifurcation. Le profil de la feuille comprimée adoptera ainsi une morphologie comparable à une partie des courbes reprises à la Figure 1 (soit la classe 2 ou 4). D'une manière assez amusante, vous avez d'ailleurs probablement déjà utilisé ces profils sans le savoir, certains logiciels générant des images virtuelles les ont incorporés pour améliorer la création de courbes.

Le problème de l'Elastica semble donc résolu depuis la fin du 18e siècle. Depuis une dizaine d'années, nous assistons cependant à un retour de ce sujet d'étude suite à la découverte accidentelle du flambage « localisé » conduisant à la formation de rides régulières. Ce renouveau illustre parfaitement le fait que les « bons » problèmes scientifiques ne sont jamais vraiment terminés ! Le profil de l'Elastica est en effet modifié quand on ajoute un substrat, ou pour le dire plus simplement, si on colle la membrane ou la tige flexible sur une fondation (qui peut elle même posséder les propriétés d'un élastique ou d'un liquide). Recommençons notre petite expérience, mais cette fois collons la feuille flexible sur un substrat mou et épais, comprimons la à nouveau de la même manière : cette fois, elle forme spontanément de petites ondulations extrêmement régulières caractérisées par une certaine distance, appelée période ou longueur d'onde (Figure 2). Notons que ces motifs qui décorent l'entièreté de la surface comprimée émergent sans aucune action locale sur cette surface. On peut facilement observer ces plis réguliers en comprimant la peau du dessus de la main entre le pouce et l'index ou bien en laissant sécher un fruit. Nous observons donc le même type d'instabilité que dans le cas d'une feuille sans substrat mais au lieu de présenter une seule ondulation sur toute sa longueur, la membrane forme à présent une structure régulière (qui ressemble à certaines courbes de la Figure 1) avec une périodicité bien définie indépendante de la taille de la feuille. Cette périodicité, λ, résulte de la compétition entre deux termes énergétiques : le terme de courbure de la feuille, favorisant les grandes λ, et la déformation du substrat mou qui favorise les petites λ. Afin de minimiser l'énergie, le système choisi un compromis entre ces deux termes en sélectionnant une λ intermédiaire (la période de la structure est en fait donnée par la relation $\lambda \sim h\,(E_m / E_s)^{1/3}$ où h, E_m et E_s sont l'épaisseur de la membrane et les modules élastiques de la membrane et du substrat respectivement).

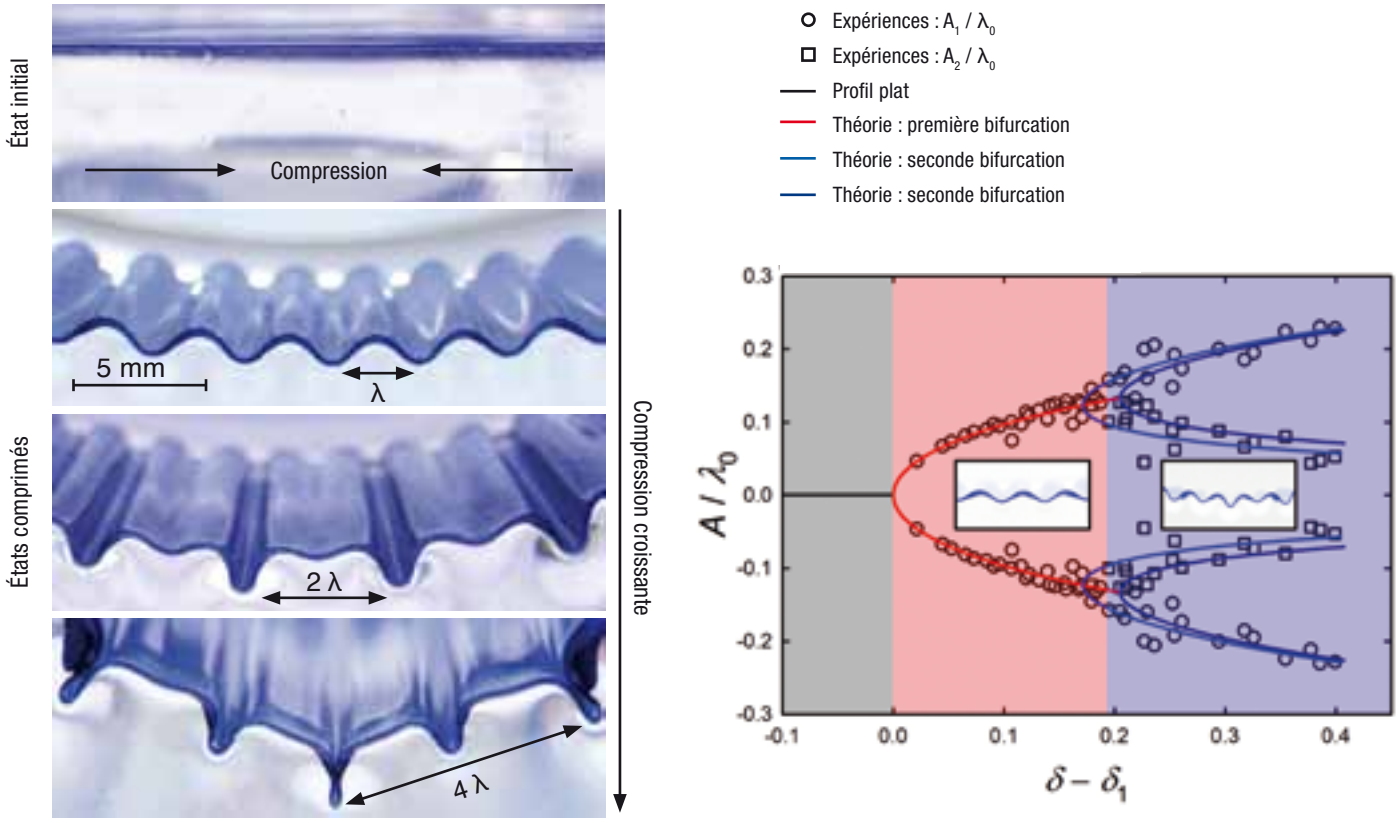


Fig. 2 : Morphologies adoptées lors de la compression d'une feuille élastique déposée sur un substrat élastomère. Evolution des amplitudes des rides avec le taux de compression montrant l'existence de bifurcations.

Si, à ce stade, on continue à comprimer la feuille davantage, un phénomène totalement nouveau et inattendu est observé. En effet, les plis formés se séparent en deux familles : l'une voit son amplitude augmenter alors que l'autre la voit diminuer (Figure 2). Un pli sur deux concentre toute l'énergie de déformation pour créer une structure avec une période double de la période initiale.

Ce doublement de période n'est observé qu'à partir d'un taux de compression minimum et correspond donc à une nouvelle bifurcation (Figure 2). Si vous augmentez à nouveau la compression, le même processus recommence pour conduire à un quadruplement de la période initiale, etc. C'est ce qu'on appelle communément une cascade de bifurcations par doublement de période. Ces cascades sont généralement observées pour des phénomènes dépendant du temps. L'hypothèse d'une équivalence temps-espace nous a permis de montrer d'une manière particulièrement originale qu'un même mécanisme physique régissait l'apparition de ces doublements de période dans les structures plissées et dans les va-et-vient de certains systèmes oscillants, des pendules par exemple. Dans un pendule la période des oscillations est définie par la longueur de la corde (et la gravité). L'amplitude des oscillations est d'abord fixée par le mouvement initial puis décroit rapidement à cause de la friction de la corde au niveau du pivot et dans l'air. Il est cependant possible de construire des « pendules éternels » par une injection continue d'énergie dans le système, c'est ce qu'on appelle un pendule paramétrique. Cet apport d'énergie peut être facilement réalisé en modifiant de manière périodique la longueur de la corde du pendule. Si les variations de la longueur de la corde se font avec une période moitié de la période naturelle du pendule, le système entre en résonance et le transfert d'énergie est optimal. L'exemple le plus connu de pendules paramétriques est l'encensoir géant de la cathédrale de Saint-Jacques-de-Compostelle, le Botafumeiro, datant du moyen-âge (Figure 3). Cet encensoir pesant 60 kg est suspendu au coeur de la nef centrale de la cathédrale. Lors de ses oscillations, huit hommes modifient de manière périodique la longueur de la corde attachant l'encensoir, permettant ainsi d'amplifier le mouvement de ce pendule amenant l'encensoir à toucher le plafond de la nef à plus de 20 m de hauteur, la vitesse maximale de cet encensoir atteint 70 km/h.

Dans notre modèle de structures plissées, les équations signalent la présence d'une résonance interne entre deux modes caractérisés par des périodes doubles l'une de l'autre. Cette résonance est à l'origine des bifurcations par doublement de période observées dans nos systèmes. Il existe donc une similitude entre les équations qui décrivent les oscillations dans l'espace — cas des structures plissées — et celles dans le temps (cas des pendules de longueur variable). Cette analogie temps-espace avait déjà été suggérée par Kichoff (1859) pour l'Elastica simple (sans substrat).

Cette étude s'inscrit dans un contexte plus large : il s'agit d'expliquer la morphogenèse (apparition naturelle de formes complexes). Pour qui cultive son sens de l'observation, une simple balade peut en effet rapidement devenir source d'interrogation. Où que l'on soit, des formes

Fig. 3 : Le Botafumeiro, encensoir géant de la cathédrale Saint-Jacques de Compostelle (voir la vidéo sur http://www.youtube.com/watch?v=2QFd_55El1I)..

complexes et des motifs réguliers s'offrent à notre regard (plissement de roches, nuages, plantes, la régularité du sable dans le fond des rivières ou le bord de la mer, les dunes etc.). Depuis les origines de l'humanité, l'Homme s'est toujours émerveillé de ces formes naturelles tellement régulières qu'elles semblent avoir été construites de la main de l'Homme (Euclide lui-même, père de la géométrie était fasciné par la structure interne des ruches). En fait, les meilleurs « designers » (chimistes, physiciens, ingénieurs) n'arrivent pas à la cheville de la Nature. Une hypothèse a rapidement été suggérée : toutes ces structures émergent spontanément par l'action de processus physiques simples lors de la croissance ou la transformation des « objets supports » (une plante, une roche, une carapace, un tissu vivant, ...).

Dans cet article nous nous sommes intéressés à la morphogenèse induite par une instabilité mécanique. Ce phénomène se produit fréquemment dans la nature, par exemple lors d'un plissement de couches géologiques donnant naissance aux montagnes ou bien lorsqu'un tissu vivant est formé de deux couches qui se développent à des taux de croissance différents (cerveau, peau, intestins). L'approche utilisée ici nous a permis de révéler des liens sous-jacents entre des phénomènes sans lien apparent et de développer un nouveau modèle théorique qui permettra de mieux comprendre et donc de prédire l'apparition de ces structures plissées. Ces travaux pourraient également avoir des répercussions dans des domaines technologiques. Ils laissent en effet espérer la mise au point de nouvelles méthodes de micro-fabrication pour modeler la matière en créant des structures micrométriques régulières. Ces surfaces micro-structurées possèdent de nombreuses applications pour contrôler la lumière (surface photoniques), le mouillage (surfaces super-hydrophobes) et bien d'autres. ■

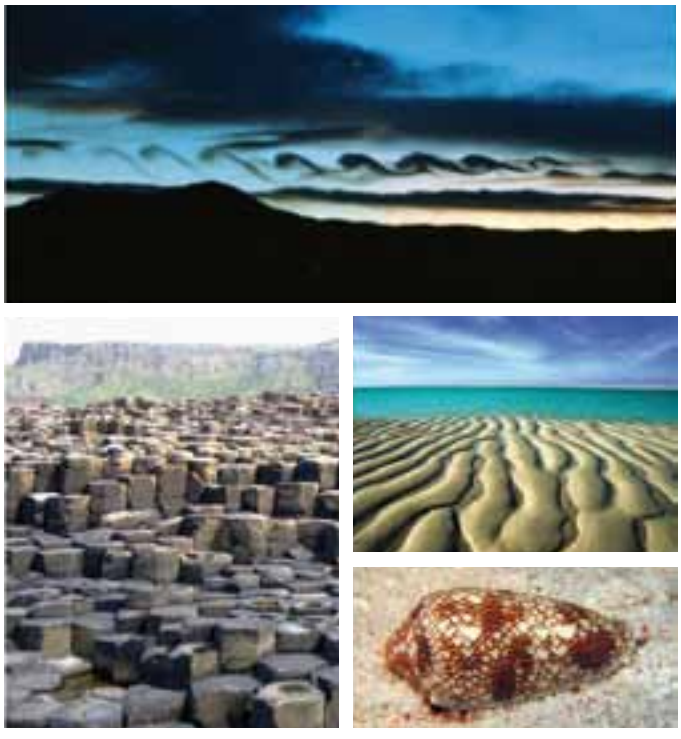


Fig. 4 : Formes complexes observées dans la Nature : « stripes » sur les dunes, instabilité de Kelvin-Helmholtz dans les nuages, chaussée des géants, coquille d'un cône.

POUR EN SAVOIR PLUS

– R. Levien, *The Elastica*, A mathematical history, 2008.
– N. Bowden, S. Brittain, A. G. Evans, J.W. Hutchinson, G.M. Whitesides, *Spontaneous formation of ordered structures in thin films of metals supported on an elastomeric polymer*, Nature 1998.
– F. Brau, H. Vandeparre, A. Sabbah, C. Poulard, A. Boudaoud, P. Damman, *Multiple-length-scale elastic instability mimics parametric resonance of nonlinear oscillators*, Nature Physics 2011.
– J.R. SanMartin, *O Botafumeiro: Parametric pumping in the middle-age*, Am. J. Phys. 1984.
– P. Ball, *The self-made tapestry*, Oxford University Press 1999.

Complexité et émergence dans l'étude du langage

» **Bernard HARMEGNIES, Véronique DELVAUX, Kathy HUET, Audrey LECLERCQ, Myriam PICCALUGA, Florence VERBANCK,**
Institut des Sciences du Langage
bernard.harmegnies@umons.ac.be

D'où vient le langage humain ? Les 6000 langues de la planète d'aujourd'hui sont-elles toutes issues d'une langue mère unique ? Le langage est-il apparu spontanément plusieurs fois en divers lieux ? Comment les scientifiques font-ils pour étudier l'origine du langage, alors que plus aucune trace de son émergence n'est disponible ?

Aucune discipline scientifique ne peut isolément répondre à ces questions : à la complexité des objets d'étude doit répondre l'émergence d'un champ transdisciplinaire, celui des Sciences du langage.

Depuis que l'homme laisse des traces de l'exercice de sa pensée, l'un des thèmes les plus récurrents de sa réflexion est le langage. Quoi de plus naturel, puisque le langage est lui-même l'outil principal de sa pensée ! Au fil des siècles, ses préoccupations ont varié (comment argumenter et convaincre ? comment stabiliser l'usage ? comment faire œuvre esthétique,…) ; mais il a fallu attendre le XIX^{ème} pour qu'apparaisse une posture nouvelle, faisant du langage un objet scientifique à part entière. Son étude serait désormais rigoureusement descriptive et, dès lors, strictement basée sur des faits observables. La linguistique ainsi fondée serait LA science du langage. Dès ses origines, elle a pris la pleine mesure de la complexité inhérente au langage, notamment en introduisant la notion de système, qui donnerait naissance à celle de structure (elle-même à l'origine d'un des courants de pensée les plus féconds du XX^{ème} siècle, le structuralisme, qui dynamisera le développement de plusieurs autres disciplines). Dès le départ, la linguistique pose que le langage englobe d'une part la langue (un immatériel système de signes commun aux locuteurs d'une communauté donnée à un moment donné) et d'autre part la parole (le concret des faits de langage produits dans la réalité de la communication) ; c'est l'exercice de la parole par les individus qui construit la langue pour la communauté.

Emergence

Bien que persuadés du caractère dynamique du langage, les linguistes des origines ont pourtant voulu circonscrire leurs objets d'étude à la langue, préférant l'approche synchronique (liée à un état du système) à l'approche diachronique (focalisée sur sa dynamique d'évolution). Ce positionnement participe certes d'une forme de bon sens teintée de cartésianisme : les langues évoluent en permanence…sérions les difficultés ! Mais en rejetant l'investigation dynamique, la linguistique des origines contourne aussi une question sensible, celle de l'évolution du système à un moment particulier de son existence : son commencement, et dès lors, scotomise la question de l'émergence. Clairement, l'affaire était délicate. Objectivement, des origines du langage, il ne demeure aucun vestige : les premiers balbutiements de l'écriture ne sont apparus que durant les cinq derniers pourcents de l'histoire du langage. Pour ces nouveaux scientifiques prônant l'empirisme du contact au phénomène, difficile de revendiquer l'étude de l'inobservable… Par ailleurs, il n'y a pas si longtemps, à cette époque, que l'étude du langage s'est éloignée du monde des croyances : Babel fait encore, pour certains, plus figure d'explication que de symbole. Et les récents travaux de Darwin sont encore soumis à forte controverse. Pas éton-

Fig. : La pierre dite « de Rosette » (du nom d'un village du delta du Nil), découverte en 1799, porte le texte d'une décret promulgué en 196 a.c. par le pharaon Ptolémée V. Le texte est écrit en deux langues (grec et égyptien), mais la version égyptienne est double (égyptien en écriture hiéroglyphique et égyptien en écriture démotique). Cette triple correspondance a permis à Champollion de découvrir la clef de décryptage des hiéroglyphes, jusqu'alors mystérieux.

Fig. : Contrat archaïque sumérien concernant la vente d'un champ et d'une maison. Shuruppak, v. 2600 av. J.-C., inscription pré-cunéiforme

Fig. : La « tablette de Kish » (3500 a.c.), le plus ancien vestige d'écriture connu.

nant qu'en 1866, la société de linguistique de Paris ait fait acter dans l'article 2 de ses statuts l'absolu refus de toute contribution ayant pour objet la question des origines du langage !

L'émergence inférée : de nouvelles méthodes

Après une longue période de calme plat, un sursaut d'intérêt pour l'émergence du langage s'est fait jour au cours des trois dernières décennies, à la faveur de spectaculaires progrès enregistrés par des disciplines externes à la linguistique (archéologie, paléoanthropologie, éthologie, paléogénétique, etc.). Certes, on ne dispose pas plus qu'en 1866 de traces directes de phénomènes datant de l'apparition du langage, mais on a pu mettre en évidence un ensemble d'éléments qui, combinés, permettent d'arriver par des voies indirectes à des scénarios crédibles. Par exemple, l'apparition, dans certains gisements archéologiques, d'outils lithiques bifaces atteste la capacité à abstraire, au départ de l'observation d'un côté d'une pierre taillée, une forme que le tailleur aura l'intention de reproduire de l'autre côté de la pierre. On peut inférer de constatations de ce type, chez les sujets montrant ces capacités, la disponibilité de prémisses cognitives nécessaires au langage, telles la symbolisation (nécessaire, par exemple, pour construire le signe linguistique, association d'une image acoustique à un concept) ou la catégorisation (permettant, notamment, de reconnaître pour équivalents des phénomènes acoustiques objectivement différents), etc. Sur certains sites, la sophistication des outils et l'extension de leur technique de fabrication à de nombreux gisements suggèrent la disponibilité de modes performants de transmission du savoir-faire. Ailleurs, l'apparition de sépultures, puis de traces rituéliques, suppose la disponibilité d'un système de communication qui permette d'évoquer, par-delà les éléments de la situation ici présente, des événements

d'un autre temps et/ou d'un autre espace… Sans compter l'étude des restes humains qui fonde certaines inférences sur les capacités phonatoires et/ou cognitives des individus.

Un scénario

La branche des hominidés s'est séparée de celle qui a amené aux singes anthropoïdes actuels il y a environ huit millions d'années. Plusieurs espèces d'australopithèques apparaissent à ce moment (tels la célèbre Lucy). Tout indique que leurs capacités communicatives étaient similaires à celles des singes anthropoïdes actuels. Par contre, le premier représentant du genre homo (l'Homo habilis, premier producteur d'outils, apparu il y a environ deux millions d'années) pourrait avoir développé une forme de pré-langage. C'est cependant avec son successeur (Homo erectus, le maître du feu), que paraît s'être développé le protolangage (un système de communication composé uniquement d'un lexique: des signes linguistiques mais pas de règles régissant leurs combinaisons). Sans doute parce que ses facultés cognitives et phonatoires amenaient de nouvelles possibilités, mais également parce que des collaborations plus efficaces entre individus étaient nécessaires au groupe, et peut-être aussi parce que le langage permet de réduire les tensions interindividuelles lorsque, l'intelligence croissant, les inhibitions instinctuelles s'étiolent, c'est probablement Homo sapiens qui a « inventé » le langage dans sa forme moderne il y a environ 100.000 ans. Il a créé la syntaxe, qui, organisant les associations des éléments du lexique en phrases, permet de conférer au langage la multiplicité de ses fonctions et la grande puissance communicative qui caractérise l'espèce humaine.

Fig. : Tour de Babel par Lucas van Valckenborgh

Une ou des émergences ?

Dans ce contexte, une question se pose inexorablement: ces processus ont-ils concerné un seul groupe d'individus, qui a ensuite essaimé à la surface de la terre, ou au contraire le langage a-t-il émergé plusieurs fois dans des communautés différentes ? Devant les travaux que certains linguistes ont développé depuis une trentaine d'années à la recherche de racines universelles censées provenir d'une unique langue mère, on ne peut que rester dubitatif (beaucoup pensent que la faible fiabilité de ces travaux apporte une espèce de démonstration par l'absurde de l'incapacité de la linguistique à traiter cette question). Par contre, la paléoanthropologie et la génétique des populations suggèrent que l'ensemble des humains vivant aujourd'hui à la surface de la terre seraient issus de ce groupe réduit d'Homo sapiens qui, entre -100.000 et -70.000, se sont répandus sur toute la surface de la planète. L'hypothèse d'une base unique n'est donc pas à rejeter, mais on ignore encore quel était l'état du système « langage » lorsque le groupe initial s'est subdivisé.

L'émergence observée : la tentation expérimentale

La tentation d'observer en direct l'émergence du langage, plutôt que de la supputer, n'est pas neuve dans l'histoire. Un pharaon égyptien, du nom de Psammétique, au VIIème siècle avant notre ère, fit isoler de jeunes nouveau-nés

pour observer quelle langue s'en exhalerait spontanément lorsqu'ils se mettraient à parler. Hérodote raconte qu'on crut percevoir un premier mot phrygien et que l'on conclut donc à l'antériorité de cette langue sur les autres du monde. Au XIII[ème] siècle, Frédéric II de Hohenstaufen, empereur du Saint-Empire Germanique, entreprit de réitérer l'expérience. Le chroniqueur Salimbene rapporte qu'il «œuvra en vain car les enfants ne purent vivre sans claquements de mains, gestes, expressions du visage et cajoleries».

L'observation systématisée de l'émergence individuelle

Quelque cruelles et insoutenables que soient ces expériences, elles anticipent un grand

© http://www.temoignages.re/gelita-hoarau-au-senat-l,39688.html

classique de l'épistémologie des sciences humaines : celui du rapprochement entre phylogenèse (développement du groupe) et ontogenèse (développement de l'individu). De ce point de vue, l'observation moderne de l'évolution du langage chez l'enfant en développement est instructive. Très tôt, il est un « citoyen du monde » capable de réagir à tous les sons de toutes les langues du monde ; dès l'âge de 10 mois, il se spécialise et apprend à catégoriser les sons de parole de son seul groupe linguistique; à la fin de sa première année, il use de la fonction symbolique et commence à maîtriser quelques mots ; son lexique va croissant et à 2 ans, se font jour les premiers énoncés multi-mots, qui, rapidement, conduisent à l'apparition de la phrase et dès lors à l'émergence de la syntaxe. Le parallèle avec la succession protolangage-langage est patent ! Si ces observations sont très largement consensuelles, d'importantes controverses se sont fait jour à propos du moteur de ce développement. Pour les innéistes, c'est le résultat du déroulement d'un programme en quelque sorte pré-câblé, géré par un dispositif ad hoc, alors que pour les acquisitionnistes, ce sont les échanges entre l'enfant et son milieu qui amènent étape par étape à la construction des structures du système langagier.

Fig. : Chien robot AIBO par Sony

L'observation fortuite de l'émergence systémique

Les hasards de l'histoire ont également permis l'observation fortuite de la naissance de langues. Tel est, par exemple, le cas de celles résultant de la capture (entre le XVI[ème] et le XIX[ème] siècles), par des européens, d'africains réduits à l'esclavage et expédiés dans des zones du monde très éloignées de leur lieu de naissance. Ces langues (les créoles) se sont toutes développées à partir des échanges entre esclaves (qui, souvent, avaient des langues maternelles différentes, parfois mutuellement incompréhensibles) et entre esclaves et geôliers, à partir d'emprunts aux diverses langues en présence. Plus récemment, la révolution sandiniste, en 1979, est indirectement à l'origine d'un phénomène d'émergence linguistique. Dans le Nicaragua prérévolutionnaire, les enfants sourds n'étaient pas distingués des handicapés mentaux et rien n'était organisé pour leur éducation. Après la révolution, une école pour sourds a été créée à Managua. Pour la première fois, une cinquantaine d'enfants sourds ont été groupés dans un même lieu. On a observé qu'apprenant à se découvrir mutuellement, les enfants, spontanément, associaient des gestes à des objets et établissaient des conventions: un lexique gestuel était en constitution; rapidement, des éléments de syntaxe sont apparus : une nouvelle langue était en train de naître!

La simulation de l'émergence systémique

Ne nécessitant ni d'attendre l'apparition fortuite d'un phénomène, ni d'exposer des cobayes humains à divers risques, la simulation informatique constitue une voie extrêmement prometteuse. Elle procède par création de plusieurs agents, qu'elle dote de capacités élémentaires, à caractère 1° sensoriel (traiter de l'information provenant de phénomènes soit acoustiques, soit lumineux), 2° actionnel (par exemple, produire des sons), 3° cognitif (aptitudes à a. catégoriser la réalité, b. générer aléatoirement des « mots », c. associer des « mots » à des aspects de la réalité catégorisée, d. bénéficier de l'harmonisation de ses connaissances avec celle de congénères). Les agents sont alors incités à échanger sans intervention humaine. Des dispositifs de ce type, « incarnés » dans des agents de formes diversifiées (des caméras disposées devant des tableaux blancs dans le projet Talking Heads ; des Aibos – chiens robots - dans les recherches menées par les centres Sony) permettent d'assister à la naissance de lexiques et à la constitution de communautés d'agents correspondant, mutatis mutandis, à ce que l'on croit savoir de l'émergence du protolangage humain. Un siècle après que la linguistique ait posé le caractère systémique du langage humain, l'intelligence artificielle le voit aujourd'hui comme un système adaptatif complexe.

Le pluriel des « sciences du langage »

Aucune des disciplines convoquées autour de la question de l'émergence du langage humain n'aurait pu, seule, en rendre compte avec efficacité. Seule la convocation simultanée de différentes approches a permis qu'apparaissent des progrès significatifs. Le traitement de la question de l'émergence ne pourra, comme beaucoup d'autres en matière de langage, tenir les promesses du présent que si le regard demeure résolument transdisciplinaire: là est le sens de la locution «sciences du langage», constitutivement plurielle. ■

Complexité du langage et récursion

» **Francis LOWENTHAL**, Service de sciences cognitives, FPSE
francis.lowenthal@umons.ac.be

Pour communiquer nous nous parlons et cela semble très simple, mais notre langage comporte beaucoup de structures complexes dont nous ne sommes pas conscients. Les enfants doivent, très tôt, les découvrir pour comprendre ce que les adultes disent. Le langage humain, à la différence des communications entre animaux, pourrait faire appel au principe de récursion. Mais qu'est-ce que ce principe ? D'où vient-il ? Peut-on l'utiliser pour simplifier la vie des enfants ?

Introduction: à propos de récursion et de langage

Un principe philosophique de base interdit d'employer le concept que l'on est en train de définir à l'intérieur de la définition elle-même : on dira « une table est un meuble composé d'un plateau horizontal posé sur un ou plusieurs pieds » (Petit Larousse), mais on ne dira jamais : « une table est une table qui … ». En d'autres termes, quand nous utilisons une définition classique le mot à définir apparaît toujours à gauche du verbe «est» et jamais à droite, dans le cœur de la définition. Une approche différente n'expliquerait rien et correspondrait à l'attitude du serpent qui se mord la queue.

Cette approche n'est pourtant pas satisfaisante quand il s'agit de décrire de manière aussi simple que possible des processus complexes qui peuvent être décrits par étapes. Ce sont les mathématiciens et les logiciens qui les premiers ont utilisé ce principe pour préciser la notion de « calculabilité » : ce principe établit que l'on peut utiliser un concept ou une fonction à l'intérieur de la définition à condition que le principe que l'on est en train de définir soit utilisé chaque fois à un degré moindre de complexité. Ceci peut nous amener à une définition simple telle celle qui figure ci-dessous :

$$f(n+1) = f(n) + f(n-1)$$

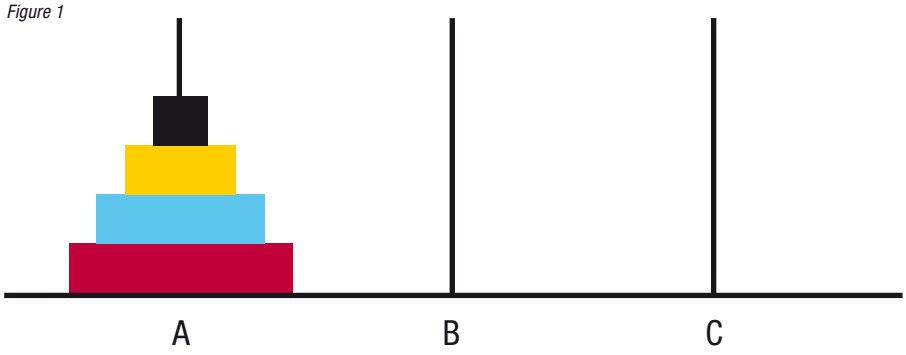
$$f(1) = 1$$

$$f(0) = 1$$

Cette fonction, toute simple, permet d'expliquer à un ordinateur comment construire la célèbre suite de Fibonacci qui ressemble à l'exponentielle, sans « grimper » aussi rapidement : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, … Cette suite permet de répondre à la question suivante : « Si on met un couple de lapins dans un lieu isolé de tous les côtés par un mur, combien de couples obtient-on après 5 mois si chaque couple engendre tous les mois un nouveau couple à compter du troisième mois de son existence ? « : le nombre de couple de lapins pour le 5ème mois est le 5ème nombre de la suite de Fibonacci.

Sans le savoir, nous utilisons le principe de récursion quand nous essayons de résoudre des petits jeux de stratégie tels la tour de Hanoï : on nous présente des disques de tailles différentes, tous placés sur un même piquet, comme on peut le voir sur la figure 1. La tâche consiste à déplacer tous ces disques du piquet A vers le piquet C en respectant deux règles : d'abord ne déplacer qu'un seul disque à la fois, ensuite ne jamais mettre un grand disque sur un autre plus petit. Le piquet B permet de déposer provisoirement des disques.

Figure 1



En essayant de trouver une solution, on constate que pour ce type d'exercices il faut appliquer deux principes : d'abord penser à atteindre l'état final en faisant « comme si » tout était déjà réglé aux étapes inférieures, et continuer ainsi de proche en proche jusqu'à ce qu'il ne faille plus penser qu'à un seul disque, l'état de base ; et ensuite ne pas hésiter à faire des allers et retours, ne pas hésiter à «reculer pour mieux sauter».

Quel lien tout ceci a-t-il avec notre langage habituel ? Nous nous exprimons souvent par phrases brèves : « Il pleut » ou « Pourrais-tu me passer le sel ? ». Mais nous employons aussi des phrases plus complexes lorsque nous devons préciser de quel objet nous parlons : « La clé est cassée » ne nous informe pas beaucoup, il vaut mieux préciser « La clé de la porte d'entrée est cassée », si notre maison a deux portes, il vaut mieux préciser « La clé de la porte qui se trouve du côté du jardin est cassée ». On pourrait encore envisager le cas de l'heureux propriétaire de deux maisons semblables qui doit préciser de quelle maison il s'agit. Le locuteur peut bien entendu le faire en produisant des énoncés simples et courts, qui sont alors placés l'un après l'autre. On dira dans ce cas que le locuteur s'exprime par concaténation, c'est-à-dire en juxtaposant des expressions simples. Malheureusement ce n'est ni élégant ni économique : nous préférons souvent utiliser des expressions pleines de propositions subordonnées, et même de subordonnées enchâssées. L'anglais et les langues germaniques sont coutumières de ce type de structure. On rencontre des phrases telles «The cheese that the rat that the cat killed ate lay in the house that Jack built» ce qui donne littéralement en français : « Le fromage que le rat, qui a été tué par le chat, a mangé, se trouvait dans la maison que Jack avait construite ». L'auteur américain Mark Twain a même dit que quand on « rencontrait une phrase allemande on ouvrait d'abord une parenthèse à l'intérieur de laquelle on trouvait une grande parenthèse au sein de laquelle on trouvait une parenthèse royale » : aux yeux de cet auteur, l'essentiel de l'idée se trouvait au cœur de la phrase, comme dans la phrase anglaise toute simple en apparence « The boy the girl Peter likes hates eats pizza » ; ce qui donne en français : « Le garçon, qui est détesté par la fille que Pierre aime, mange de la pizza », phrase française moins lourde à traiter par notre cerveau parce que les relatives y sont moins enchâssées grâce au recours à la voie passive. Ce type de phrase avec enchâssements est fréquent en anglais et en allemand, mais est moins fréquent dans les langues latines. Pourtant, nous pouvons en rencontrer et nous devons admettre qu'il y a là une économie de formulation que nous payons par une surcharge cognitive lors de la compréhension : même si nous ne les aimons pas, nous sommes capables de les comprendre. Les subordonnées relatives enchâssées que l'on rencontre là représentent précisément un exemple d'application du principe de récursion.

Pourquoi attacher autant d'importance à ce type de phrase ? Et pourquoi attacher autant d'importance à la récursion dans le langage ?

D'après Hauser, Chomsky et Fitch (2002) il y aurait deux « facultés de langage » : l'une appelée « faculté de langage au sens large » serait commune aux humains et aux animaux non humains, l'autre appelée « faculté de langage au sens étroit » serait spécifique aux humains : cette « faculté de langage au sens étroit » comprendrait le principe de récursion qui nous serait donc propre. Depuis lors différents auteurs ont réalisé des expériences dont les résultats sont, comme souvent en science, apparemment contradictoires : les singes tamarins ne comprendraient pas les structures enchâssées mais des corbeaux partageraient le principe de récursion avec nous !

Ces recherches sont sans doute intéressantes pour les spécialistes, mais elles ne semblent rien apporter à ceux qui se soucient simplement de faire en sorte que les jeunes enfants apprennent vite et bien les structures complexes du langage humain. Pourtant, en faisant des recherches à propos des hypothèses de Hauser, Chomsky et Fitch (2002), Friederici et al (2006) ont montré que les phrases et structures simples (telles : « Il pleut et je mets mon imperméable ») ne sont pas traitées par les mêmes zones neuronales du cerveau humain que les phrases et structures plus complexes (celles qui comprennent des relatives emboîtées ou des relations à distance sans emboîtements, telle : « Si le chat avait mangé deux grosses souris bien grasses et n'avait pas fait sa promenade ensuite alors il aurait de bonnes raisons d'être sérieusement malade »). Il est dès lors tout à fait légitime de se demander s'il est possible de trouver une méthode qui favoriserait le développement de ces dernières structures neuronales chez les enfants.

Une approche nouvelle : les NVCD

En 1983 nous avions introduit, indépendamment de ce qui précède, une approche nouvelle pour observer et favoriser le développement cognitif chez l'enfant normal ou handicapé : les «Non Verbal Communication Devices» (NVCD). Chaque NVCD est basé sur une approche quasi non-verbale des situations-problème utilisées et sur la manipulation d'un matériel spécifique muni de contraintes techniques : on pourrait prendre comme exemple simpliste des exercices basés sur la construction de chemins par un jeune enfant qui doit utiliser des briques Lego placées sur une plaque de base (voir figure 2).

Très curieusement, nous avons démontré que l'emploi de cette approche non verbale favorise le développement de productions verbales complexes chez de jeunes enfants sains de 6 et 7 ans et l'acquisition de la lecture. Lefebvre (2002) a montré que cette approche favorise une meilleure organisation visuospatiale à 6 ans : ces activités sont toutes liées à la complexité langagière décrite plus haut.

Des approches de type NVCD ont aussi été utilisées avec de jeunes patients ayant une lésion cérébrale localisée. Ces patients, qui avaient perdu la fonction langagière, ont reconstruit partiellement une communication structurée et d'autres fonctions cognitives supérieures. Le « cas Saïd » (Lowenthal et Saerens, 1986) illustre très bien ce fait. Le développement de Saïd a été normal jusqu'à l'âge de 13 mois. Il commençait à produire des phrases d'un seul mot (holophrases) et à comprendre ce que ses parents lui disaient. Il a fait une méningite suivie d'une hémiplégie droite. Saïd a récupéré de l'hémiplégie mais a depuis d'importantes lésions cérébrales bilatérales dans les zones du langage. A cause de toutes ces lésions, Saïd a perdu toute possibilité de produire ou de comprendre un langage structuré comme le nôtre. Toutes les thérapies classiques ont échoué. Nous avons entrepris une remédiation cognitive de type NVCD. Après 3 ans, Saïd est devenu capable de comprendre notre langage verbal, de communiquer de manière structurée, de lire, d'écrire et de calculer.

Ces observations suggèrent une conjecture que nous avons publiée en 1999 : « les manipulations impliquées dans les approches de type NVCD pourraient favoriser une réorganisation cérébrale ». En 2006 Lefebvre a démontré une version plus faible de cette hypothèse : il a employé une approche de type NVCD avec de jeunes adultes et il a observé leur activité cérébrale dans une tâche «langage». Les observations sous IRMf montrent que les sujets utilisent plus de neurones dans une zone centrale du cerveau (les noyaux de la base) après l'emploi d'une approche NVCD, comme si les manipulations impliquées les avaient aidés à devenir plus efficace pour ce type de tâche (voir figure 3).

En guise de conclusion provisoire

Les approches de type NVCD concernent uniquement des manipulations d'objets concrets pour résoudre des problèmes présentés de manière non verbale. On peut dès lors se demander pourquoi ces approches ont une influence sur les tâches langagières et pourquoi cela se traduit au niveau de notre cerveau.

En réfléchissant à cette question, nous ne pouvons nous empêcher de penser que, dans le cadre d'une approche de type NVCD, il est facile de proposer des exercices qui impliquent l'emploi de structures récursives. Dès lors, si Hauser et ses collègues ont raison, une approche de type NVCD pourrait permettre d'exercer chez l'enfant, très tôt, cette activité récursive qui semble essentielle pour le langage humain adulte. Nous n'avons pas encore de réponse à ce sujet : c'est là le propre de la recherche fondamentale, toute réponse ouvre une porte qui amène à une nouvelle question. Mais nous avons une nouvelle hypothèse à étudier. ■

Figure 2

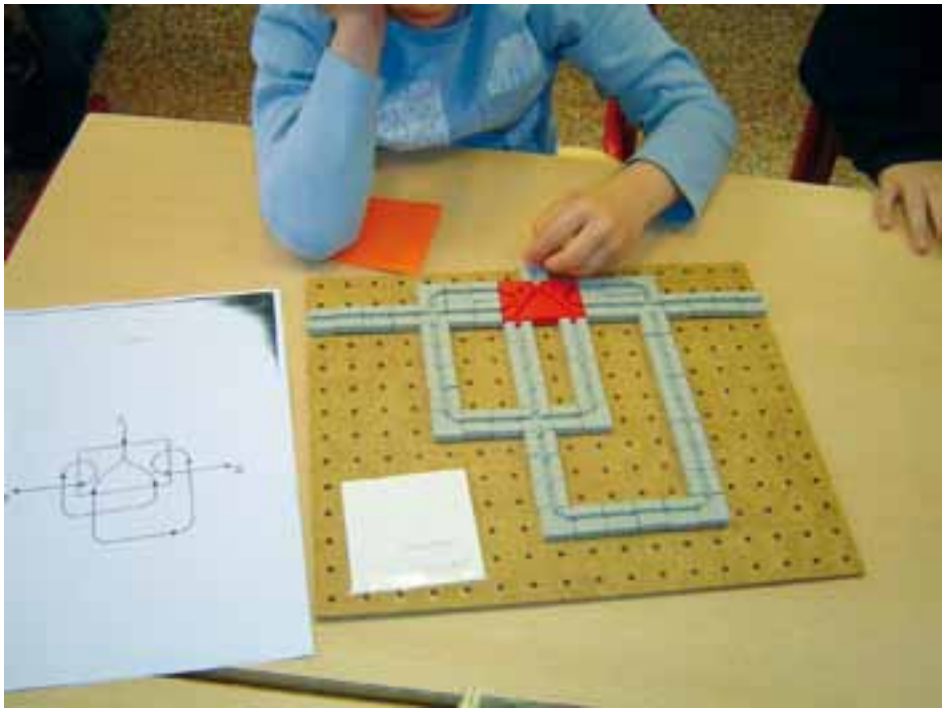
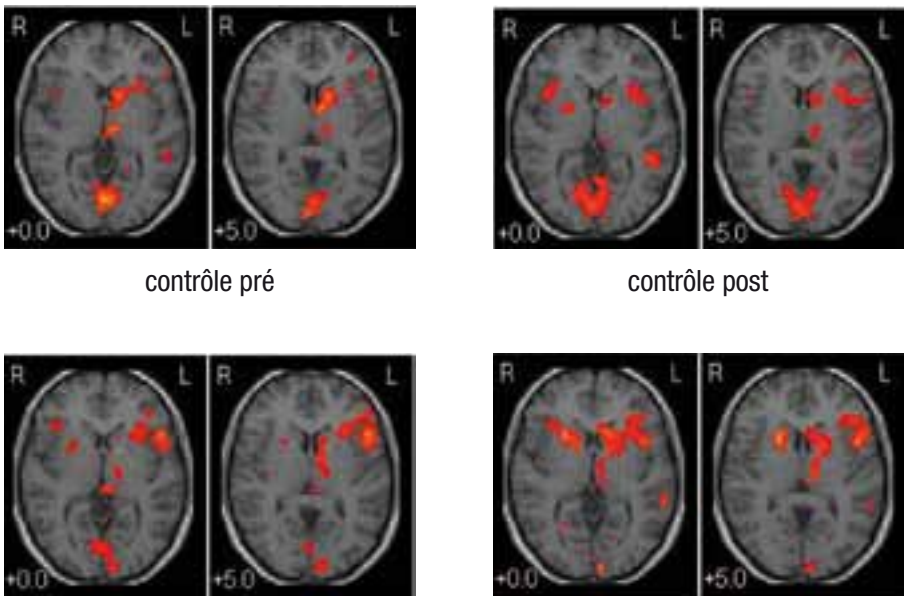


Figure 3

Réorganisation cérébrale



contrôle pré | contrôle post

expérimental pré | expérimental post

Laurent Lefèbvre (2006)

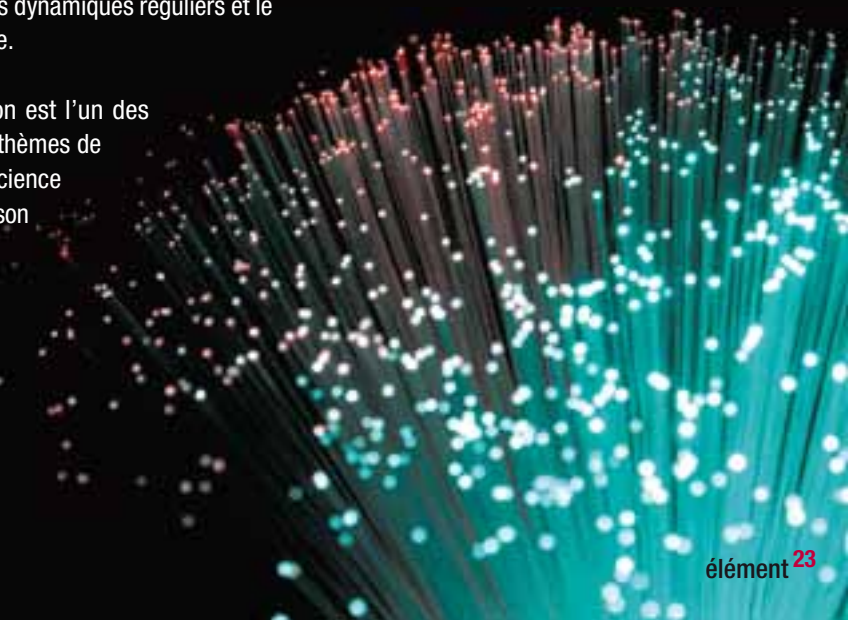
Le chaos et la synchronisation dans les systèmes dynamiques non-linéaires : application aux lasers

» **Fabien ROGISTER**, Service de Physique générale, FPMs
fabien.rogister@umons.ac.be

Les lasers ne sont pas seulement des composants-clés de notre technologie : ce sont aussi des systèmes dynamiques fortement non-linéaires. Puisque le chaos peut dégrader considérablement leurs performances, la question de leur stabilisation et de leur contrôle se pose naturellement. Par ailleurs, lorsque de nombreux lasers sont couplés, ils sont susceptibles de se synchroniser, ce qui permet d'obtenir des faisceaux lasers avec une intensité maximale extrêmement élevée. Enfin, la synchronisation de deux lasers fonctionnant en régime de chaos disposés aux extrémités d'une ligne de transmission peut être utilisée à des fins cryptographiques.

L'étude de la dynamique des systèmes non-linéaires fut bousculée par la mise en exergue accidentelle du chaos déterministe par Edward Lorenz en 1963 alors qu'il étudiait un modèle simplifié de la convection dans l'atmosphère. Les mots « chaos déterministe » désignent le comportement irrégulier de systèmes non-linéaires dont des lois dynamiques permettent, en principe, de déterminer l'évolution à partir de la connaissance de leur état antérieur. L'une de ses marques est la sensibilité aux conditions initiales[1] qui a pour conséquence que d'infimes modifications de celles-ci peuvent conduire à des évolutions totalement différentes. En pratique, il peut donc être impossible de prédire le comportement à long-terme de systèmes non-linéaires déterministes, même très simples - une limitation souvent désignée comme effet papillon d'après la célèbre métaphore de Lorenz : «le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ?»[2]. L'exploration de la dynamique des systèmes non-linéaires a depuis envahi tous les domaines de la science et on a établi l'existence de lois universelles - indépendantes de la nature des systèmes - qui sous-tendent la transition entre les comportements dynamiques réguliers et le chaos déterministe.

La synchronisation est l'un des autres principaux thèmes de recherche de la science du non-linéaire et son étude s'est également répandue dans un grand nombre de domaines, tant en physique, qu'en chimie, en ingénierie ou en biologie. Elle est par ailleurs omniprésente dans la nature - citons par exemple le muscle cardiaque qui comporte un ensemble de cellules synchronisées qui amorcent ses contractions, le fonctionnement du cerveau qui repose sur l'interaction de myriades de neurones, certains comportements collectifs



[1] Propriété déjà découverte par Henri Poincaré à la fin du 19ème siècle dans ses travaux sur le problème des trois corps en mécanique céleste.
[2] Cf. l'article de Karl Gorsse-Erdmann dans ce numéro.

d'animaux (p.ex., des nuées de lucioles clignotant en chœur dans les forêts de Thaïlande et les mouvements coordonnés des bancs de poissons) ou encore les applaudissements à l'unisson d'une assistance enthousiaste à la fin d'un spectacle ! Ces processus de synchronisation sont également importants dans de nombreuses applications technologiques, notamment liées au couplage de lasers.

Stabilisation et contrôle de diodes lasers

Les diodes lasers présentent de nombreux avantages par rapport aux autres types de lasers. Leur très petite taille (environ 250 µm), la possibilité de les produire en masse à bas coût et leur faible consommation sont autant d'atouts qui les ont rendues indispensables dans les réseaux de télécommunications par fibres optiques et les systèmes de sauvegarde de données (DVD…). Elles sont par contre extrêmement sensibles aux rétroactions optiques qui se produisent lorsque la lumière émise est partiellement réfléchie sur un obstacle et réinjectée avec un délai dans le laser. Leur sensibilité à ces perturbations externes est une conséquence de la mauvaise qualité de leurs miroirs (la lumière externe est donc facilement réinjectée) et leur très fort gain qui amplifie ces perturbations. Celles-ci conduisent à des instabilités dynamiques qui, à leur tour, dégradent sévèrement les performances des diodes lasers comme la cohérence de la lumière émise. D'un point de vue applicatif, il est évidemment souhaitable de pouvoir contrôler cette dynamique pour, par exemple, obtenir un faisceau laser de puissance constante. Malheureusement la théorie générale du contrôle ne peut être utilisée en raison de la forte non-linéarité du système et des ses fréquences caractéristiques très élevées (plusieurs GHz). Il est donc nécessaire d'étudier le dispositif avec les outils développés pour l'analyse des systèmes non-linéaires pour pouvoir comprendre ses propriétés et les modifier de façon ad hoc pour obtenir le comportement souhaité.

Lorsque le temps pris par une fraction de la lumière émise pour être réinjectée dans la diode après réflexion sur un miroir semi-réfléchissant externe est particulièrement court, la dynamique de ce laser est caractérisée par l'émission en rafale d'impulsions lumineuses. Ces impulsions sont générées très régulièrement avec une période proche du retard de la rétroaction mais leur amplitude décroît graduellement tout au long d'une même rafale. Pour un ingénieur, il est bien entendu tentant de tirer parti de la première caractéristique de ce régime dynamique tout en corrigeant la seconde, en d'autres mots de conserver l'émission régulière et à grande cadence d'impulsions lumineuses mais de modifier le système pour que leur amplitude soit constante. L'étude minutieuse du système montre que l'émission de chaque impulsion s'accompagne d'un décalage vers le rouge de la fréquence optique du laser. On peut donc avoir l'intuition que si l'on parvenait à induire un décalage vers le bleu de la fréquence de la lumière réinjectée, on parviendrait peut-être à obtenir des impulsions lumineuses d'amplitude constante[3]. Les simulations numériques [Rogister, Opt. Lett. 31, 2432 (2006)] confirment cette intuition comme le montre la Figure 1.

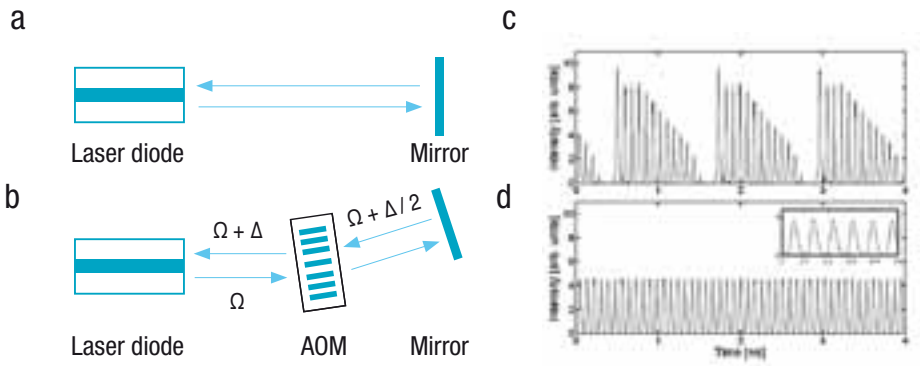


Figure 1 : (a) Diode laser soumise à une rétroaction optique : une fraction de la lumière émise est réfléchie sur une surface semi-réfléchissante et est réinjectée dans la diode. (b) Diode laser soumise à une rétroaction optique avec un décalage de fréquence. Une onde de pression qui se propage dans le cristal d'un modulateur acousto-optique diffracte la lumière qui le traverse et décale sa fréquence par effet Doppler. Le rayon diffracté est réfléchi par un miroir et retourne dans le laser en suivant le trajet inverse, subissant au passage par le cristal un second décalage de sa fréquence. (c) Puissance émise par la diode laser sans et (d) avec décalage de la fréquence de la rétroaction.

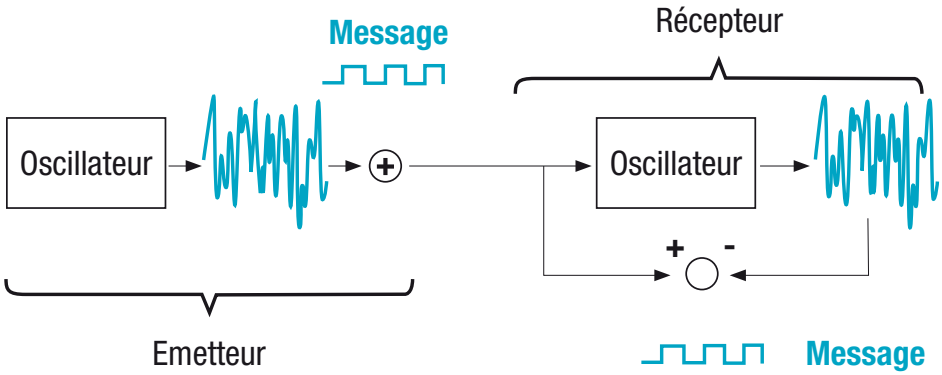


Figure 2 : Un message est masqué dans le signal chaotique généré par un premier oscillateur. Les deux sont injectés à l'extrémité de la ligne de transmission dans un second oscillateur, réplique du premier. Cet oscillateur reproduisant uniquement le signal généré par le premier, le message est récupéré en comparant la sortie de la ligne de transmission et le signal produit par le récepteur.

[3] Les concepts sur lesquels cette intuition repose sortent du cadre d'une présentation générale. Ils sont exposés dans la référence Rogister, Opt. Lett. 31, 2432 (2006).

Synchronisation et cryptographie

Bien que l'on connaisse depuis le 17ème siècle et les travaux de Huygens sur la « sympathie des horloges » la tendance naturelle qu'ont des oscillateurs périodiques à se synchroniser lorsqu'ils sont couplés, la possibilité que des systèmes évoluant en régime de chaos se synchronisent eux aussi paraît paradoxale à première vue. En effet, à cause de leur sensibilité aux conditions initiales, les états de deux systèmes chaotiques devraient rapidement diverger avec le temps en raison d'inévitables différences entre leurs conditions initiales, même si ces systèmes étaient rigoureusement identiques – ce qui est de toute façon impossible en pratique. L'expérience démontre toutefois que lorsqu'ils sont adéquatement couplés, ces systèmes exercent une forme de contrôle mutuel et peuvent se synchroniser quelques soient leurs conditions initiales respectives.

L'amélioration de la confidentialité des communications est une application de la synchronisation entre systèmes dynamiques chaotiques. Un message de faible amplitude peut en effet être dissimulé dans le signal erratique de plus grande amplitude et à large bande généré par un émetteur chaotique. A l'autre bout de la ligne de transmission, un récepteur se synchronise sur l'émetteur pourvu qu'il en soit une copie très fidèle et que le couplage entre les deux soit bien conçu. Le message peut alors être récupéré en comparant les signaux générés par l'émetteur et le récepteur (Figure 2).

Les lasers se sont rapidement révélés être des candidats de choix pour cette application depuis la démonstration expérimentale réalisée au moyen de lasers à fibre de la possibilité de transmettre à haut débit des messages masqués par du chaos [Van Wiggeren & Roy, Science 279, 1198 (1998)]. Au cours des dix dernières années, une grande partie des recherches dans le domaine a été consacrée à l'utilisation de diodes lasers soumises à des rétroactions optiques étant donné que celles-ci sont les sources optiques les plus répandues dans les systèmes optiques de communication à haut débit. Par ailleurs, le retard de la rétroaction optique induit des régimes de chaos de très grande complexité ce qui complique l'interception malintentionnée des messages. Plusieurs équipes ont pu transmettre des messages avec des débits de 10 Gbit/s (10 milliards de bits par seconde) au moyen de lasers à fibres ou de diodes lasers. Le lecteur trouvera un état de l'art dans la référence [Uchida, Rogister, Garcia-Ojalvo & Roy, Prog. In Optics 48, 203 (2005)].

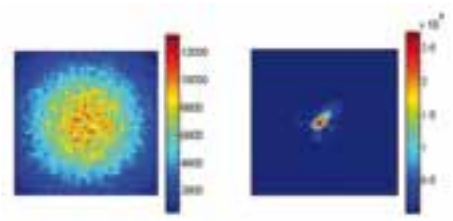


Figure 3 : Figures d'interférence que l'on devrait obtenir au moyen d'un réseau carré de 400 (20 × 20) lasers. A gauche, les lasers ne sont pas synchronisés. A droite, ils le sont. L'intensité lumineuse est donnée en unités arbitraires.

Réseaux de lasers

La réalisation de sources lasers pouvant délivrer une puissance optique très élevée est un des enjeux majeurs de la photonique. Un empilement en réseau de nombreux lasers est une solution mais le faisceau laser résultant souffre d'une cohérence spatiale et temporelle médiocre. Cependant, les lasers constituant le réseau peuvent se synchroniser si l'on parvient à réaliser un couplage adéquat entre eux. Dans ce cas, les ondes émises par tous les lasers interfèrent constructivement sur l'axe de symétrie du réseau, ce qui conduit à une réduction considérable de la divergence du faisceau et à une intensité lumineuse maximale proportionnelle au carré du nombre des lasers (Figure 3) [Rogister & Roy, Laser Phys. 15, 313 (2005)]. Les applications des réseaux de lasers mis en phase, et dont le fonctionnement est stationnaire ou pulsé, sont nombreuses. Le perçage et la découpe de pièces et l'ablation en sont d'évidentes. Ces réseaux de lasers sont même envisagés par certains comme leurres anti-missiles.

Dans la perspective d'une recherche plus fondamentale, ils sont des exemples réalisables en laboratoire de réseaux d'oscillateurs nonlinéaires interconnectés entre eux. Bien que les oscillateurs constituant ces systèmes puissent se déstabiliser mutuellement, des comportements collectifs très ordonnés émergent à l'échelle d'un réseau lorsque l'interaction entre ses éléments est suffisamment forte. En guise d'exemple, nous avons pu mettre en évidence la génération de solitons spatiaux dans des réseaux de lasers [Rogister & Roy, Phys. Rev. Lett. 98, 104101 (2007)]. Des lois générales décrivent la synchronisation de grands réseaux d'oscillateurs et l'apparition de comportements collectifs. Elles relèvent plus de la nature du couplage et de la topologie des réseaux que des propriétés intrinsèques des oscillateurs qui les composent comme nous avons pu le constater avec des lasers Nd:YAG[4] [Rogister, Thornburg, Fabiny, Möller, & Roy, Phys. Rev. Lett. 92, 093905 (2004)].

J'ai obtenu la plupart des résultats présentés ci-dessus dans le Service Electromagnétisme et Télécommunications de la FPMs avec le soutien du Fonds National de la Recherche Scientifique et des Pôles d'Attraction Interuniversitaires 4-07 et 5-18. J'ai obtenu les résultats sur les réseaux de lasers à l'Université du Maryland avec le Prof. Rajarshi Roy (University of Maryland, College Park, USA), les Drs Scott Thornburg et Larry Fabiny (Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA) et le Dr Michael Möller (Université de Munster, Allemagne). ■

1. F. Rogister, *Control of an external-cavity laser diode operating in the regular pulse package regime with a frequency shift of the optical feedback*, Optics Letters 2006.
2. G.D. Van Wiggeren & R. Roy, *Communications with chaotic lasers*, Science 1998.
3. A. Uchida, F. Rogister, J. Garcia-Ojalvo & R. Roy, *Synchronization and communication with chaotic lasers*, Progress in Optics 2005.
4. F. Rogister & R. Roy, *Spatiotemporal Chaos Synchronization in a Large Array of Locally Coupled Nonidentical Lasers*, Laser Physics 2005.
5. F. Rogister & R. Roy, *Localized Excitations in Arrays of Synchronized Laser Oscillators*, Physical Review Letters 2007.
6. F. Rogister, K.S. Thornburg, L. Fabiny, M. Möller, & R. Roy, *Power-Law Spatial Correlations in Arrays of Locally Coupled Lasers*, Physical Review Letters 2004.

[4] Lasers Nd:YAG ou lasers à grenat d'yttrium-aluminium dopés au néodyme.

Complexité des données et compression informatique

» **Olivier DELGRANGE**, Service d'Informatique Théorique, Faculté des Sciences
Olivier.Delgrange@umons.ac.be

La complexité des données est difficile à définir. Cependant, la théorie de la complexité de Kolmogorov définit une suite complexe de symboles comme une suite qui serait incompressible. En principe, cette complexité est impossible à diagnostiquer de manière absolue mais les méthodes pratiques de compression permettent de se faire une bonne idée de la complexité des suites. Ces méthodes peuvent être utilisées, non seulement pour gagner de l'espace sur son disque dur, mais également comme outils d'analyse de complexité des données.

S'il est une notion complexe à définir, c'est bien celle de *complexité* ! Dans cet article, nous tentons une définition de la complexité des données qui soit objective, robuste et qui ne soit pas autoréférentielle. Il est usuel d'opposer la « complexité » à la « simplicité ». Ainsi, sont complexes les données… qui ne sont pas simples ! Faisons évoluer cette phrase, digne de Lapalisse, suivant la pensée du philosophe Guillaume d'Ockham (XIV^{ème} siècle) : *pluralitas non est ponenda sine necessitat*; pensée qui peut être traduite par « les entités ne doivent pas être multipliées sans nécessité ». De cette pensée est né le principe du rasoir d'Ockham : *lorsque plusieurs descriptions peuvent modéliser exactement la même chose, la description la plus simple doit être choisie*. Ce principe n'est bien entendu pas une règle absolue permettant de choisir la meilleure description, mais plutôt une règle expérimentale permettant de guider le bon sens lorsque des alternatives existent et que l'on désire étudier en priorité celle qui a plus de chance de nous conduire à la bonne solution.

Codage binaire et contenu brut en information

Les données que nous manipulons sont généralement représentées par des suites de caractères. Par exemple, le texte que vous lisez est codé sur l'alphabet latin augmenté des chiffres, des lettres accentuées, ... La suite des décimales de π est représentée par une suite (infinie) de chiffres. Les séquences d'ADN (qui composent les génomes des organismes vivants) sont codées par des suites sur l'alphabet {A,C,G,T}[1]; ainsi, TGTCCCCAATTA décrit une séquence d'ADN. La suite 10010100101001100101 décrit la suite de 20 tirages binaires (par exemple pile = 0, face = 1), etc. Les suites de caractères sont bien des descriptions des données qu'elles encodent. Toutefois, dans l'ordinateur, toutes ces suites sont recodées en une suite de bits (suite de symboles de l'alphabet binaire {0,1}). Notons que le bit est, par nature, la plus petite entité capable de coder une information. Pour évaluer le contenu brut en information d'une suite de caractères, il nous faut connaître le nombre de bits nécessaires à son codage, sans réelle transformation, sur {0,1}. Si une suite, de longueur n, est écrite sur un alphabet à m lettres, son contenu brut en information est $n \log(m)/\log(2)$ bits. Par exemple, la séquence d'ADN ci-dessus peut

être codée en 111011010101010000111100 en convenant de coder chaque caractère sur 2 bits : A par 00, C par 01, G par 10 et T par 11. Son contenu brut en information est de 24 bits. Sachant que toute suite peut être recodée sur l'alphabet binaire, nous nous intéressons dans cet article à la complexité des séquences binaires uniquement.

Compression, régularités et limites

La compression informatique sans perte (l'intégralité de l'information peut être reconstruite par décompression, notion à opposer à la compression avec perte mise en œuvre dans les formats tels que mp3, jpeg, ...) vise à calculer des descriptions plus courtes des mêmes données. Si une méthode de compression a pu réduire la taille de la description, la nouvelle description obtenue est une meilleure description dans le sens du rasoir d'Ockham. La compression sans perte peut être utilisée pour évaluer la complexité des suites binaires. La suite S=00000000000000000000000000000000 semble « simple » alors que la suite T=01101001100101101001011001101 0 semble « complexe ». Dans l'absolu, ces deux suites de 30 bits ont pourtant exactement la même probabilité d'apparition : $1/2^{30}$ (en supposant que la répartition des bits soit uniforme). Une méthode de compression exploite des redondances pour comprimer. Supposons que le type de redondances utilisé soit les répétitions consécutives d'un symbole. La séquence S se comprime en « 30*0 » (nous faisons ici abstraction du codage de « 30*0 » en binaire). Si une méthode de compression ne parvient pas à comprimer une séquence, on peut conclure que les redondances exploitées par la méthode ne sont pas présentes. La séquence peut être considérée comme « complexe » vis à vis de ce type de redondances. Cela ne signifie pas pour autant que la séquence ne puisse pas être comprimée à l'aide d'une autre méthode ! Mais il peut facilement être démontré que **toutes les suites binaires ne sont pas compressibles** ! En effet, un simple comptage du nombre de suites plus courtes que l bits montre qu'au moins une des 2^l suites de l bits n'est pas compressible.

Complexité de Kolmogorov d'une suite

La *théorie de la complexité de Kolmogorov* (d'après le nom du mathématicien Andreï Kolmogorov), aussi appelée théorie algorithmique de l'information, définit **une suite complexe comme une suite qui ne possède pas de description plus courte**. Ainsi, la suite *S* est « simple » puisqu'elle peut être décrite de manière très courte : « 30*0 », alors qu'il semble difficile, a priori, de trouver une plus courte description de la suite *T*. Une version comprimée d'une suite peut être vue comme un programme informatique qui reconstruit la suite (exemple : le programme « afficher 30 fois 0 », traduit en binaire). *La complexité de Kolmogorov* d'une suite *x*, notée *K(x)*, est la longueur du plus petit programme qui engendre *x*. Ainsi, **une suite est qualifiée de « complexe » si sa longueur est égale à sa complexité de Kolmogorov** : il n'est pas possible d'en trouver une plus courte description. Malheureusement, la complexité de Kolmogorov d'une suite n'est pas calculable en général : il n'est pas possible de connaître la plus courte description de toute suite !

Approximation de la complexité de Kolmogorov par les méthodes de compression

Les méthodes de compression tentent donc d'approcher la complexité *K(x)*, c'est-à-dire d'en donner une valeur supérieure, en exploitant au maximum les régularités présentes dans *x*. Si une version plus courte peut être trouvée, on peut conclure que les données possèdent certaines régularités (celles exploitées par la méthode). Dans le cas contraire, on ne peut pas conclure que les données sont complexes : d'autres régularités cachées pourraient être présentes. Ainsi, la suite *T* présentée ci-dessus semble a priori incompressible alors qu'elle est en fait très régulière. Il s'agit des 30 premiers bits de la suite de *Thue-Morse*, obtenue à partir de la suite « 0 » par itérations successives du programme : « remplacer les 0 par 01 et les 1 par 10 ». Elle n'est donc pas complexe au sens de la complexité de Kolmogorov.

[1] L'ADN est une macromolécule linéaire dont chaque élément est appelé nucléotide. Tous les nucléotides ont la même structure chimique, à l'exception de la base azotée qui peut être soit l'*Adénine* (A), la *Cytosine* (C), la *Guanine* (G) et la *Thymine* (T).

[2] http://atgc.lirmm.fr/star/

Analyse de données par compression

Nous avons développé, dans le Service d'Informatique Théorique de l'Université de Mons, le logiciel STAR (Search for Tandem Approximate Repeat) utilisable, via internet, par la communauté scientifique[2]. Ce logiciel tente de comprimer une séquence d'ADN pour y localiser des *répétitions en tandem approximatives* d'une petite séquence donnée. Il s'agit de zones qui peuvent être impliquées dans certaines maladies génétiques telles que la maladie de Huntington (maladie d'ordre neurologique à évolution progressive). Les répétitions en tandem approximatives sont les régularités exploitées pour comprimer. Si l'algorithme parvient à comprimer une séquence, on conclut que de telles répétitions sont présentes.

« Dans la nature, les objets réguliers sont beaucoup plus présents que les objets complexes : les redondances liées aux symétries diverses et structures répétitives semblent gouverner ce monde »

Profondeur logique de Bennett

Une autre notion de complexité d'une suite est associée à la complexité de Kolmogorov. La profondeur logique de Bennett d'une suite est définie par le temps nécessaire à la construction de la suite par le plus court programme. Plus grand est ce temps, plus complexe est la suite. Pour l'illustrer, prenons le cas précis du calcul des 10^6 premières décimales de π. La complexité de Kolmogorov de cette suite est très petite puisque π est défini de manière concise comme le rapport entre la circonférence d'un cercle et son diamètre. Il « suffit donc » de considérer le plus court programme qui calcule la suite des décimales de π (que l'on limite aux 10^6 premiers chiffres). Dans ce cas précis, le temps de calcul est très conséquent. Le fait que l'on choisisse le plus court programme est primordial car sans cela, le programme le plus rapide serait « imprimer -.....- » où -.....- est constitué des caractères de la suite. Cette nouvelle notion met bien en évidence la grande complexité de la suite des décimales de π car, bien qu'il existe des programmes courts pour calculer les décimales, ceux-ci calculent longtemps. Il en est de même pour les objets fractals, souvent faciles à décrire mais longs à calculer. **La profondeur de Bennett est donc une nouvelle évaluation de la complexité d'une suite**, intimement liée (par le fait que le plus court programme doit être considéré) à la complexité de Kolmogorov.

Mesure probabiliste de Levin

Dans la nature, les objets réguliers sont beaucoup plus présents que les objets complexes : les redondances liées aux symétries diverses et structures répétitives semblent gouverner ce monde. Nous savons que les suites correspondant aux descriptions d'objets réguliers sont mieux compressibles que celles correspondant aux objets complexes. La mesure de *Levin m(x)* établit la probabilité d'apparition d'une suite x selon la formule : $m(x)=1/2^{K(x)}$. Une suite très régulière x se voit ainsi attribuer une grande probabilité (car $K(x)$ est petit) et une suite complexe une faible probabilité. Selon ce modèle probabiliste, un objet structuré est ainsi beaucoup plus probable qu'un objet complexe. Il s'agit là d'une vision du monde où les objets sont produits par des programmes ou des mécanismes assimilables simples (les descriptions comprimées). Même si cette vision n'est que grossièrement vraie, elle explique le succès des programmes de compression : bien que certaines données concrètes sont très complexes, et donc incompressibles, elles sont rares ! La majorité des données concrètes sont régulières et donc compressibles.

En conclusion, la complexité des suites est déterminée par leurs compressibilités. La compressibilité d'une suite est égale à sa complexité de Kolmogorov. Bien que celle-ci ne soit pas calculable, les méthodes de compression approchent cette complexité. Ces méthodes ne sont donc pas seulement utiles pour gagner de l'espace de stockage, mais également pour analyser la complexité des données. Toutefois, il faut aussi considérer la profondeur de Bennett, liée au temps nécessaire de reconstruction des données. Même si les données sont compressibles, si ce temps est important, les données sont complexes ! Enfin, la mesure de Levin permet d'établir que les données incompressibles sont aussi très rares en pratique. ■

- DELAHAYE, J-P. (1995). *Logique, informatique et paradoxes*, Paris : Editions Belin.
- DELAHAYE, J-P. (1999). *Information, complexité et hasard*, Paris : Editions Hermès.
- DELAHAYE, J-P. (2003). La complexité mesurée... Pour la Sciences, n°314, pp. 34-38.
- DELGRANGE, O. & RIVALS E. (2004). *STAR: an algorithm to Search for Tandem Approximate Repeats*, Bioinformatics, vol. 20, 2812–2820.
- LI, M. & VITÁNYI, P. (2008, 3ème éd.). *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer.

L'ORDINATEUR AU CŒUR DE LA DÉCOUVERTE MATHÉMATIQUE

» **Hadrien MÉLOT**[1], **Christophe TROESTLER**[2], 1: Institut d'Informatique, 2: Institut de Mathématique (FS)
christophe.troestler@umons.ac.be, hadrien.melot@umons.ac.be

L'ordinateur, inventé par des mathématiciens, transforme à son tour le regard et les outils dont ceux-ci disposent dans l'exploration de problèmes mathématiques difficiles. Dans cet article, des questions de coloriage de graphes, ainsi que l'étude de modèles mathématiques de phénomènes physiques complexes, illustreront l'impact croissant des techniques de preuves assistées par ordinateur dans la découverte mathématique. Ces questions montreront le rôle essentiel de l'ordinateur dans le travail du mathématicien en lui permettant de gérer la complexité de certaines preuves.

Dans les sciences expérimentales et appliquées, l'usage de l'ordinateur est omniprésent. Il est indispensable dans l'analyse des grandes quantités de données provenant des expériences ainsi que dans la simulation des systèmes complexes. Cette utilisation de l'outil informatique à des fins d'analyse et de calcul est bien connue, des projets tels que folding@home[1] permettent même à chacun d'y participer modestement. On pourrait penser que les mathématiques, royaume des raisonnements abstraits, utilisent peu les calculs numériques. Or, depuis l'invention de l'ordinateur, les mathématiciens les ont utilisés à chaque étape du processus de découverte.

On peut schématiser ce processus comme suit. D'abord, le mathématicien énonce quelque chose qui lui semble être vrai : il formule une *conjecture*. Il tente ensuite d'établir avec certitude sa vérité ou sa fausseté. Si un *contre-exemple* est identifié, alors la conjecture est rejetée ou, éventuellement, reformulée. Par contre, si une *preuve* est trouvée, alors celle-ci devient un résultat mathématique, sous la forme d'un théorème. L'ordinateur est utilisé pour explorer, dériver ou infirmer des conjectures de manière interactive et parfois de manière totalement automatisée. Plus surprenant peut-être est l'importance croissante que l'ordinateur joue dans les preuves mathématiques. C'est précisément ce dernier point que nous tentons de vous faire découvrir dans le présent article.

Mathématiques discrètes

L'exemple le plus célèbre du rôle primordial joué par l'ordinateur dans une preuve mathématique complexe est sans conteste celui du *théorème des quatre couleurs*. Celui-ci affirme que « toute subdivision du plan en régions contigües peut être coloriée avec au plus quatre couleurs, de telle manière que deux régions adjacentes n'aient pas la même couleur ». Une telle subdivision du plan est *une carte planaire*. Un exemple de carte est donné à la figure 1. Il est à noter que deux régions — comme par exemple certains états américains — ne se touchant que par un point ne sont pas dites adjacentes. On attribue la paternité de la « conjecture des quatre couleurs » au cartographe F. Guthrie qui fut capable en 1852 de colorier la carte des cantons d'Angleterre avec seulement quatre couleurs. Malgré la simplicité de l'énoncé, il faudra attendre plus d'un siècle pour qu'une preuve en soit donnée.

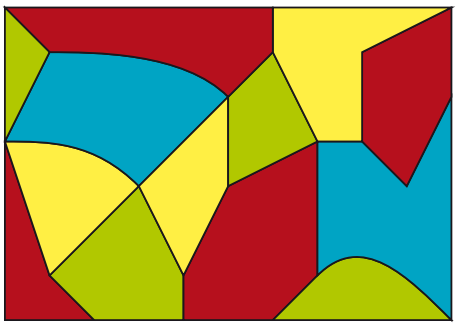


Figure 1 : Carte coloriée avec 4 couleurs.

[1] http://folding.stanford.edu/

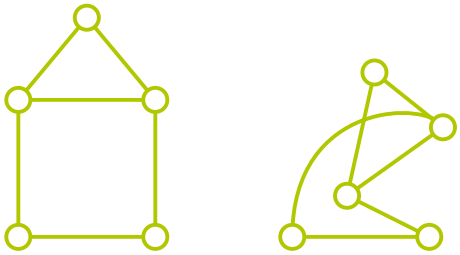


Figure 2 : Deux représentations d'un même graphe.

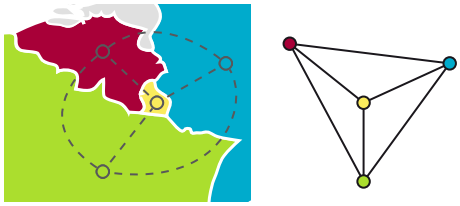


Figure 3 : Correspondance entre cartes et graphes planaires.

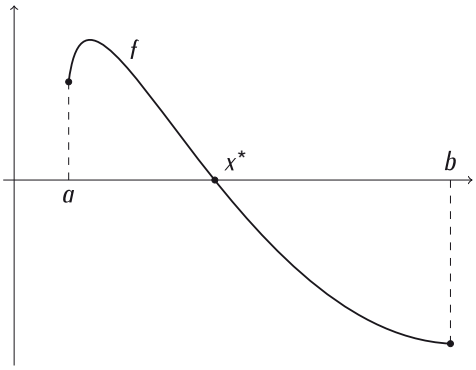


Figure 4 : Racine d'une fonction

Le théorème des quatre couleurs peut être énoncé de manière formelle grâce à la théorie des graphes. Un *graphe* est un objet mathématique constitué de *sommets* et de relations entre certaines paires de sommets (les *arêtes*). Un graphe se représente très facilement à l'aide de cercles (correspondant aux sommets) et de lignes joignant certaines paires de cercles (les arêtes). Dans un tel dessin, l'emplacement des cercles ou le fait qu'une ligne soit droite n'a pas d'importance. Seule la *structure* importe, c'est-à-dire la présence ou non d'une arête entre deux sommets donnés. Ainsi, deux représentations d'un seul et même graphe sont illustrées à la figure 2. Si un graphe peut être représenté de telle sorte que les lignes ne se croisent pas, on dit qu'il est *planaire*.

Toute carte planaire peut être modélisée par un graphe planaire : il suffit d'associer un sommet à chaque région et d'ajouter une arête entre deux sommets s'ils correspondent à des régions adjacentes. Une carte à quatre régions et le graphe associé sont illustrés à la figure 3.

Une *coloration* de graphe revient à colorier les sommets d'un graphe en s'assurant que deux sommets adjacents n'ont pas la même couleur. Le théorème des quatre couleurs devient : « tout graphe planaire peut être colorié avec au plus quatre couleurs ». Le graphe de la figure 3 possède une propriété intéressante par rapport à la coloration : il constitue le plus petit exemple montrant que trois couleurs ne suffisent pas. D'un point de vue cartographique, ce graphe modélise la situation du Luxembourg entouré par la Belgique, l'Allemagne et la France ; ces trois derniers pays étant deux à deux limitrophes. Quatre couleurs sont donc nécessaires pour colorier n'importe quel graphe planaire. Il reste à prouver que quatre couleurs sont également suffisantes.

C'est seulement en 1976 que K. Appel et W. Haken proposent une preuve basée sur la notion de configuration réductible introduite par G. D. Birkhoff au début du XX^{e} siècle. Ils identifient 1936 configurations particulières dont il faut montrer la réductibilité pour établir que tout graphe planaire est coloriable avec quatre couleurs. Ensuite, ils font appel à l'ordinateur (environ 50 jours de calculs à l'époque) pour vérifier que chacune de ces configurations est bien réductible. D'autres preuves ont suivi mais toutes ont requis l'aide de l'ordinateur : elles ne sont pas vérifiables « à la main » (ce qui a d'ailleurs provoqué la controverse). Ainsi, en 1997, N. Robertson, D. P. Sanders, P. D. Seymour et R. Thomas publient une nouvelle preuve n'utilisant plus que 633 configurations et automatisent également la première partie de la preuve permettant d'obtenir cet ensemble de configurations. En 2005, G. Gonthier et B. Werner écrivent une version formelle de la preuve de N. Robertson et al. à l'aide du programme *Coq* développé en France par l'INRIA.

Les graphes — qui modélisent bien d'autres situations concrètes que des cartes — constituent un exemple de structures *discrètes* qui, par définition et par essence, ne requièrent pas la notion de continuité. Les objets mathématiques discrets ont une particularité très utile : en général, il y en a une infinité, mais ils sont *énumérables*. Dans ce domaine, la machine surpasse de loin l'Homme et l'énumération est bien souvent à la base de l'aide apportée par l'ordinateur. C'est le cas par exemple du système GraPHedron, développé à l'Institut d'Informatique de l'UMONS (en collaboration avec l'ULB) et capable de générer des conjectures en théorie des graphes de manière interactive et, dans certains cas, entièrement automatique. Il est également utile dans la construction des preuves et a notamment permis de résoudre un problème mentionné comme ouvert depuis 1962.

Mathématiques continues

L'ordinateur est également employé pour les mathématiques dites « continues ». Celles-ci apparaissent dans la modélisation d'un grand nombre de phénomènes physiques, économiques, ou industriels, notamment par le biais d'équations différentielles. Comprendre ces équations, pour le mathématicien, ne signifie pas simplement inférer les comportements de leurs solutions à partir de quelques calculs et simulations numériques. La certitude des connaissances mathématiques repose, en effet, sur des définitions précises et des chaînes de déductions sans faille. Afin d'expliquer comment l'ordinateur peut y aider et quels sont les défis à relever, considérons un exemple de base : la preuve de l'existence de la *racine d'une fonction*. Notons f une fonction à valeurs réelles dépendant d'une variable x qui peut varier dans un intervalle $[a, b]$. On cherche une racine x^* de f, c'est-à-dire un x^* dans $[a, b]$ qui annule f (voir figure 4). Imaginons que f soit compliquée, rendant toute analyse « à la main » impraticable.

Notons que très souvent, les fonctions dépendent de nombreuses variables, ce qui augmente encore la difficulté.

La première chose à remarquer est qu'il est impossible pour un ordinateur d'évaluer *f* en tous les points de l'intervalle [*a*, *b*] vu qu'il y en a une infinité. Heureusement, le théorème dit « des valeurs intermédiaires » affirme que, si f est continue et si *f(a)* et *f(b)* sont de signes opposés, alors *f* possède une racine dans [*a*, *b*]. Si la continuité de f doit être vérifiée par le mathématicien, on peut espérer utiliser un programme informatique pour évaluer *f(a)* et *f(b)*. Or *f* n'est en général pas calculable exactement par un ordinateur. On le comprend facilement si on se rappelle que les ordinateurs ne peuvent travailler qu'avec un nombre fini de digits alors que de simples opérations telles que prendre la racine carrée de 2 génèrent des nombres qui en possèdent une infinité. Ceci implique que les calculs sur ordinateur sont arrondis et, par conséquent, qu'on peut seulement *estimer* les valeurs de *f(a)* et *f(b)*. La crainte est alors que l'accumulation de ces petites erreurs d'arrondi ne change le signe de *f(a)* ou *f(b)*. Cette crainte est fondée : il existe des exemples de programmes retournant des résultats totalement erronés dû à l'amplification de ces erreurs d'arrondi. Comment faire dès lors pour s'assurer que le signe du résultat n'est pas affecté ?

La solution est simple : demander à l'ordinateur de faire le travail pour nous ! Une manière de procéder est de faire appel à *l'arithmétique d'intervalles*. Son principe est de remplacer toute valeur x par un intervalle $[\underline{x}, \overline{x}]$ qui exprime l'incertitude qu'on a sur celle-ci. Par exemple, $\sqrt{2}$ pourrait être remplacé par [1,41; 1,42] qui contient la valeur exacte de $\sqrt{2}$. Toutes les opérations (+, –, sin,...) sont redéfinies pour agir sur des intervalles. La garantie est la suivante : si $f([\underline{x}, \overline{x}])$ désigne l'intervalle calculé avec ces nouvelles opérations à partir de $[\underline{x}, \overline{x}]$, on est sûr qu'il contient la valeur exacte de *f(x)*. Dans notre cas, il suffit de prendre des intervalles $[\underline{a}, \overline{a}]$ et $[\underline{b}, \overline{b}]$ qui contiennent *a* et *b*. Si $f([\underline{a}, \overline{a}])$ et $f([\underline{b}, \overline{b}])$ ne contiennent pas 0, alors on connaît le signe de *f(a)* et *f(b)* avec certitude et le théorème des valeurs intermédiaires nous garantit l'existence d'une racine.

Remarquons que l'évaluation de *f* sur d'autres intervalles permet de localiser la racine *x**. Ceci est illustré sur la figure 5 où on est certain que *x** appartient au petit intervalle bleu. Un théorème affirme que, si la dérivée de *f* ne s'annule pas sur cet intervalle, la racine est unique. À nouveau, l'arithmétique d'intervalles permet à un ordinateur de vérifier l'hypothèse de ce théorème.

Les techniques que nous venons d'esquisser (théorèmes mathématiques combinés avec des estimations rigoureuses faites par ordinateur) forment la base des preuves assistées par ordinateur en analyse mathématique. Celles-ci sont actuellement en plein essor. Comme exemple particulièrement intéressant, citons le système d'équations de Lorenz qui est un modèle très simplifié de la dynamique atmosphérique. En 1998, Z. Galias et P. Zgliczynski ont montré, à l'aide de l'ordinateur, que ce système exhibe un comportement chaotique. Son comportement à long terme, reflété par son attracteur (représenté sur la figure 6), a été inclus dans la liste de 18 problèmes difficiles pour le 21e siècle proposée par S. Smale, médaillé Fields. En 2002, W. Tucker a résolu ce problème en montrant, au moyen d'une preuve assistée par ordinateur, que l'attracteur de Lorenz possède une dimension non-entière.

En guise de conclusion, mentionnons que ces méthodes sont utilisées par l'équipe d'Analyse Numérique de l'UMONS pour étudier les propriétés qualitatives (en particulier les symétries) des solutions d'équations aux dérivées partielles. Ces recherches sont réalisées en collaboration avec l'Université du Connecticut et avec le soutien du F.R.S.-FNRS. ■

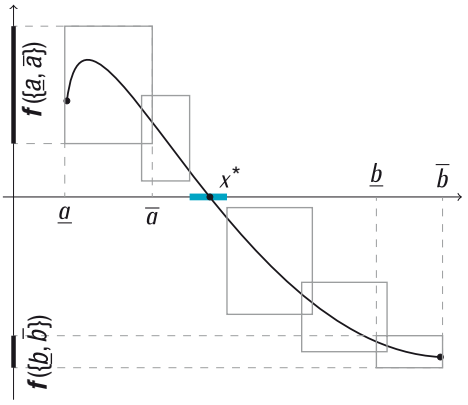


Figure 5 : Évaluation d'une fonction grâce à l'arithmétique d'intervalles.

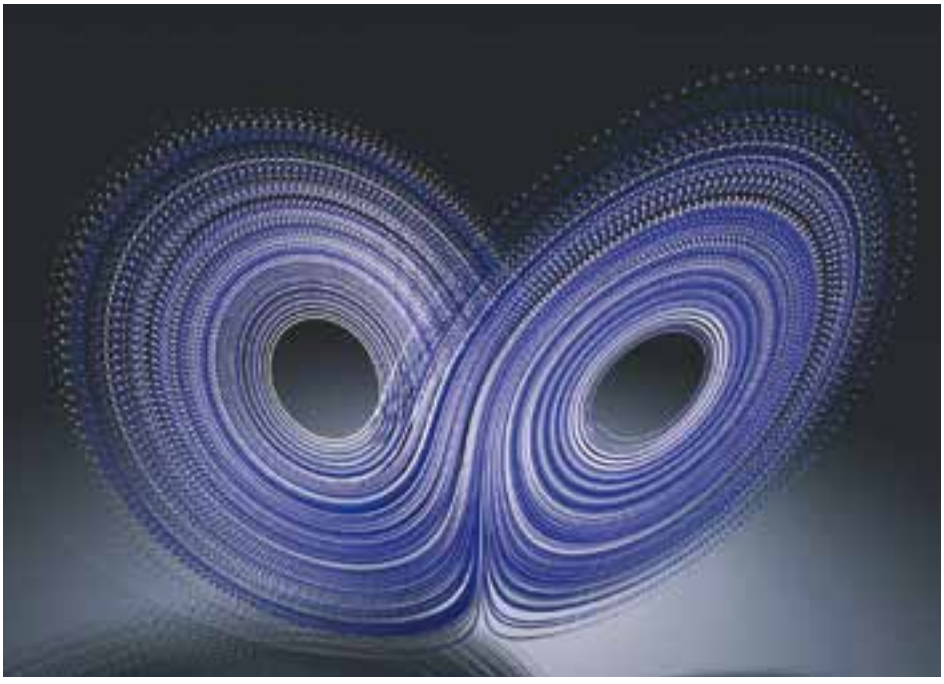


Figure 6 : Attracteur de Lorenz.

NON, les ordinateurs ne seront jamais TOUT-PUISSANTS !

» Thomas. **BRIHAYE**, Véronique **BRUYÈRE** et Hadrien **MÉLOT** – Instituts de Mathématique et Informatique, FS
veronique.bruyere@umons.ac.be

Contrairement à une certaine croyance populaire, les ordinateurs (et l'informatique en général) ne permettent pas de résoudre tous les problèmes. Le but de cet article est d'introduire la notion de *complexité algorithmique* qui permet de décrire les limites de l'informatique.

Un *algorithme* énonce la résolution d'un problème bien posé sous la forme d'une série *d'étapes de calcul* à effectuer de telle sorte à produire une *sortie* à chaque *entrée* soumise. Les étapes de calcul sont écrites dans un langage de programmation afin d'obtenir un programme informatique que l'on peut exécuter sur un ordinateur. On attend d'un algorithme qu'il résolve *correctement* un problème et que la sortie soit calculée en un temps *raisonnable*.

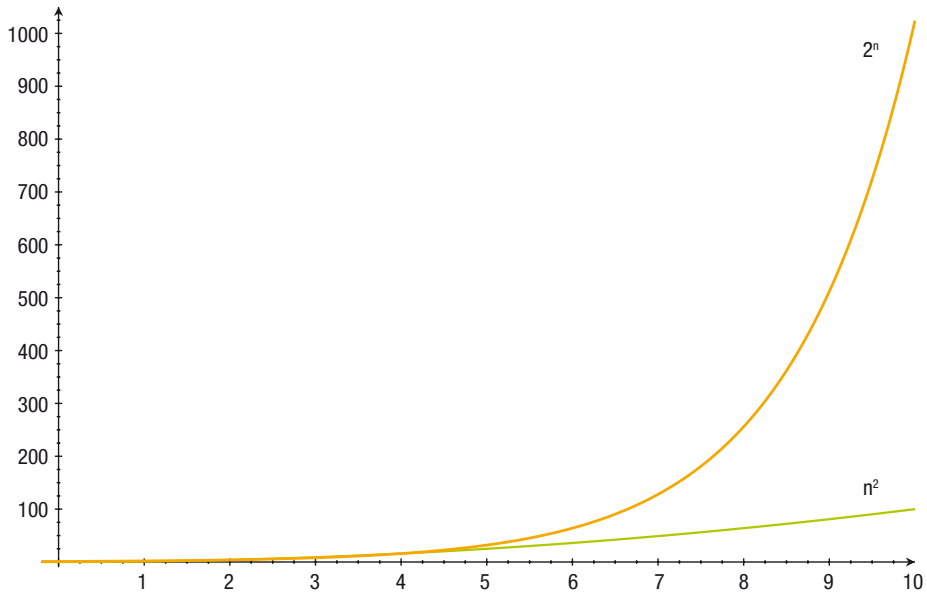
Un problème important est celui du tri de données pour lequel de nombreux algorithmes ont été développés. Nous présentons ici l'algorithme de *tri par insertion*. Les joueurs de cartes l'utilisent pour classer les cartes qui leur ont été distribuées. La main gauche tient les cartes déjà triées, tandis que la main droite insère chaque nouvelle carte reçue au bon endroit parmi les cartes de la main gauche (voir Figure 1). Cet algorithme de tri propose la série d'étapes de calcul suivante, une étape de calcul étant le placement d'une carte dans la main gauche, ou la comparaison d'une carte avec une autre :

1. Placer la première carte reçue dans la main gauche.
2. Pour chaque nouvelle carte *c* reçue
   a. comparer cette carte *c* avec chaque carte de la main gauche jusqu'à repérer l'endroit où l'insérer.
   b. placer la carte *c* à cet endroit.

Fig. 1 : Tri par insertion

Une majoration du temps nécessaire pour trier n cartes peut être estimée directement sur l'algorithme précédent sans devoir l'exécuter sur un ordinateur, en comptant le nombre d'étapes de calcul à effectuer. La pire situation est celle où chaque nouvelle carte reçue doit être comparée à toutes les cartes de la main gauche. Ainsi, si la carte c est la ième reçue, il faut la comparer aux i-1 cartes de la main gauche avant de l'y placer, soit un total de i étapes de calcul. Le tri par insertion nécessite donc au pire de *l'ordre* de n^2 étapes de calcul (précisément 1+2+ … +n = n×(n+1)/2 étapes) pour trier n cartes. Sachant qu'une étape de calcul peut être exécutée sur un ordinateur en au plus 1 nanoseconde, trier mille cartes prend de l'ordre de 0,001 seconde tandis que trier cent mille cartes prend de l'ordre de 10 secondes. Imaginons un autre algorithme de tri, appelé tri gourmand, demandant au pire un nombre d'étapes de calcul de l'ordre de 2^n, au lieu de n^2. Trier vingt cartes prendrait alors de l'ordre de 0,001 seconde tandis que trier cent cartes dépasserait ... l'âge de l'univers ! Ce comportement est mis en évidence sur la Figure 2 où la croissance de n^2 et de 2^n est indiquée en fonction de n.

Fig. 2 : Croissance de n^2 et de 2^n



De manière générale, la *complexité* d'un algorithme est le nombre d'étapes de calcul nécessaires pour calculer la sortie à partir d'une entrée de taille n, dans la pire situation possible. Elle est souvent exprimée comme un ordre de grandeur en fonction de n. Les informaticiens estiment que les seuls algorithmes "raisonnables" sont les algorithmes *polynomiaux*, c'est-à-dire de complexité polynomiale ou encore de la forme n^k pour un certain k. C'est donc le cas pour l'algorithme de tri par insertion mais pas pour l'algorithme de tri gourmand qui présente une complexité *exponentielle*.

La célèbre question $P \stackrel{?}{=} NP$ a été posée par Stephen Cook en 1971, et à ce jour aucun chercheur en informatique n'a pu y apporter de réponse. Un prix d'un million de dollars sera attribué à celui qui la résoudra (voir www.claymath.org/millennium/). Tentons d'expliquer cette question. La *classe P* rassemble tous les problèmes pouvant être résolus par un algorithme polynomial. Pour certains problèmes, il s'avère difficile de trouver la solution, mais dès que celle-ci est fournie, il est facile de vérifier qu'elle résout bien le problème. Il suffit de penser à une grille de Sudoku qui, une fois remplie, peut être facilement vérifiée, alors qu'il est parfois diabolique de trouver comment compléter la grille. La *classe NP* rassemble tous les problèmes tels que si la solution est fournie, alors celle-ci peut être vérifiée comme étant correcte par un algorithme polynomial. La question $P \stackrel{?}{=} NP$ demande si les classes P et NP sont égales ou pas. Une réponse positive signifierait que vérifier l'exactitude d'une solution serait aussi facile que de calculer cette solution. Les chercheurs en informatique pensent que $P \neq NP$, mais à ce jour n'ont pu le démontrer.

Fig. 3 : Puzzle de 4 pièces

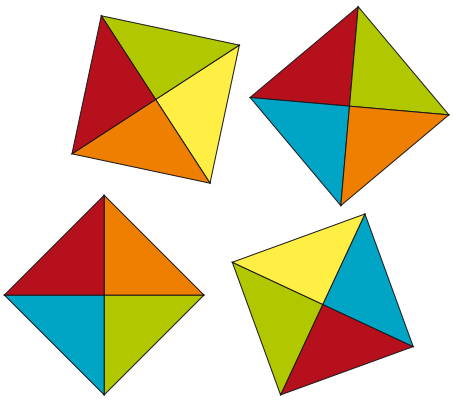
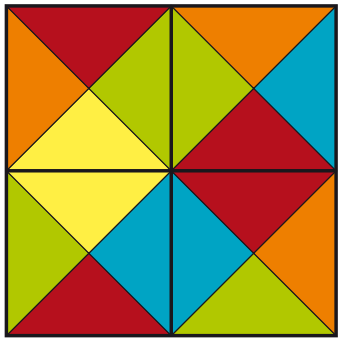


Fig. 4 : Une solution



Présentons un problème simple de *puzzle* appartenant à la classe *NP*, mais pour lequel aucun algorithme polynomial n'est connu à ce jour. Commençons en considérant un puzzle de 4 pièces carrées, formées chacune de 4 triangles de couleur différente. Le but du puzzle est de placer ces pièces sur une grille carrée de taille 2×2 de telle sorte que les triangles qui se touchent soient de la même couleur. Un exemple de puzzle est donné sur la Figure 3. Nous invitons le lecteur à tenter de le résoudre (sans regarder la solution proposée sur la Figure 4) pour qu'il puisse se rendre compte de sa difficulté.

Passons au cas général d'un puzzle de n^2 pièces carrées à placer sur une grille de taille $n \times n$. Ce problème appartient à la classe *NP*. En effet, si quelqu'un propose un placement des pièces sur la grille, on peut facilement s'assurer qu'il s'agit d'une solution du puzzle en comparant les couleurs des triangles qui se touchent. On peut se convaincre que $2n \times (n-1)$ comparaisons de couleur sont nécessaires pour le vérifier. Cette tâche peut donc être effectuée par un algorithme polynomial.

Par contre, calculer une solution (plutôt que d'en vérifier une) s'avère être une tâche bien plus ardue. Montrons-le d'abord sur le puzzle de 4 pièces. Un algorithme naïf consiste à essayer tous les placements possibles sur la grille des différentes pièces. Afin d'évaluer la complexité de cet algorithme, comptons le nombre de possibilités. Nous avons 4 façons de placer la première pièce choisie sur la grille vide. Il reste ensuite 3 façons pour placer la seconde pièce, 2 pour la troisième pièce, et une seule pour la dernière pièce. A priori, nous avons donc $4\times3\times2\times1 = 24$ (noté 4!) possibilités pour remplir la grille. Mais attention, ce calcul ne tient pas compte des différentes rotations des pièces. En effet, une fois son emplacement choisi, une pièce peut y être placée de 4 façons différentes. Le nombre total de placements est donc de $24\times4^4 = 6144$. Dans le pire des cas, l'algorithme devra tous les essayer avant de trouver une solution au puzzle (obtenue par le dernier placement testé). Enfin, comme on l'a vu auparavant, vérifier qu'un placement est correct nécessite 4 comparaisons de couleurs de triangles. Ainsi dans la pire situation, l'algorithme naïf proposé effectue $6144\times4 = 24576$ étapes de calcul.

A ce jour, aucun algorithme polynomial permettant de résoudre le problème de puzzle n'est connu. L'algorithme naïf présenté pour 4 pièces peut être généralisé au cas de $N = n^2$ pièces, le nombre d'étapes de calcul étant alors égal à $N!\times4^N\times2n\times(n\text{-}1)$ dans le pire des cas. Il s'agit d'un algorithme de complexité exponentielle. Pour mieux comprendre son comportement catastrophique, quelques exemples de temps d'exécution sont donnés sur la Figure 5 (avec d'autres temps d'exécution donnés à titre de comparaison). Des algorithmes plus subtils ont été élaborés pour résoudre le problème de puzzle, mais aucun n'est polynomial. Ce problème est connu pour être parmi « les plus difficiles » de la classe *NP* ; on dit qu'il est *NP-complet*. Trouver un algorithme polynomial semble assez improbable au vu de la question $P \stackrel{?}{=} NP$.

Envisageons maintenant une variante du problème de puzzle, appelée problème de *pavage du plan*. Ce problème diffère du problème de puzzle en trois points : le plan (infini) tout entier doit être recouvert plutôt qu'une grille (finie) ; on dispose d'un nombre fini de pièces, et d'une infinité de copies d'entre elles ; les pièces ne peuvent pas subir de rotation. Résoudre le problème de pavage du plan consiste à déterminer si, étant donné un nombre fini de pièces, il est possible ou non de recouvrir le plan tout entier. Un exemple de pièces avec lesquelles le pavage est possible est donné sur la Figure 6, où seulement une portion finie du plan est pavée (mais cette portion va pouvoir s'étendre à l'infini). Un autre exemple pour lequel le pavage est impossible est donné sur la Figure 7.

Fig. 5 : Exemples de temps d'exécution

Algorithme naïf pour le puzzle 2 × 2	0, 00002 sec.
Tri par insertion de 1000 cartes	0, 001 sec.
Tri gourmand de 20 cartes	0, 001 sec.
Tri par insertion de 100000 cartes	10 sec.
Algorithme naïf pour le puzzle 3 × 3	$(1, 1).10^3$ sec.
Une journée (24 heures)	$(8, 6).10^4$ sec.
Tri gourmand de 50 cartes	$(1, 1).10^6$ sec.
Temps écoulé depuis la disparition des dinosaures	$(8, 5).10^{13}$ sec.
Algorithme naïf pour le puzzle 4 × 4	$(2, 1).10^{15}$ sec.
Âge de l'univers	$(1, 9).10^{16}$ sec.
Tri gourmand de 100 cartes	$(1, 2).10^{21}$ sec.
Algorithme naïf pour le puzzle 5 × 5	$(6, 9).10^{32}$ sec.

Ce problème est en fait bien plus compliqué que le problème de puzzle. En effet, on peut démontrer mathématiquement qu'il n'existe *aucun* algorithme qui étant donné un ensemble de pièces, soit capable de résoudre le problème de pavage du plan, ce quels que soient le temps et les ressources disponibles. Un tel problème est dit *indécidable*. Le fait qu'il n'existe pas d'algorithme n'est pas lié à une insuffisance technologique ou à un manque de connaissance actuelle. Cette limite constitue une barrière théorique « infranchissable » Ce type de résultat peut paraître surprenant, mais peut être rendu formel et tout à fait rigoureux grâce à la théorie de la calculabilité.

Cela fait beaucoup de mauvaises nouvelles ! Ce n'est pas tout à fait vrai ... Revenons aux problèmes difficiles mais décidables, comme le problème de puzzle. Ceux-ci sont très nombreux et possèdent quantité d'applications concrètes. C'est le cas de beaucoup de *problèmes d'optimisation*, où l'on s'intéresse à rechercher une solution *optimale* parmi toutes les solutions possibles. Par exemple, étant donné n villes et les distances entre celles-ci, le problème du *voyageur de commerce* consiste à trouver un

Fig. 6 : Pavage possible

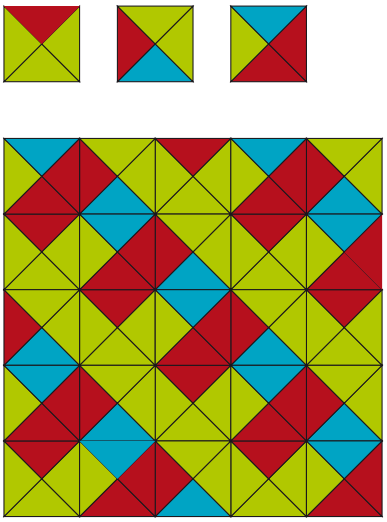
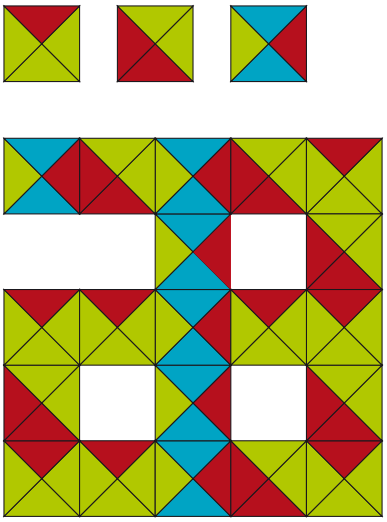


Fig. 7 : Pavage impossible



plus *court* chemin qui passe exactement une fois par chaque ville et revient à la ville de départ. Les domaines d'application sont nombreux notamment dans les transports et en logistique. Une manière naïve de résoudre ce problème (*NP*-complet) est d'énumérer tous les chemins possibles et d'en repérer un plus court. Un petit calcul montre qu'il y a (n-1)!/2 différents chemins : avec 60 villes, cela représente plus de possibilités qu'il y a d'atomes dans l'univers (10^{80}) !

Comment aborder ce genre de problèmes en pratique ? L'idée est de se contenter d'une solution *approchée* (plutôt qu'optimale) mais pouvant être déterminée par un algorithme polynomial, et pour laquelle on a une certaine garantie de sa qualité. On parle d'*algorithme d'approximation*, avec la garantie exprimée comme un facteur d'éloignement de la solution approchée fournie par rapport à une solution optimale, dans le pire des cas. Pour le problème du voyageur de commerce, on possède un tel algorithme avec un facteur d'éloignement de 3/2. En d'autres mots, le chemin qu'il propose est au pire de longueur 50% plus grande qu'un chemin le plus court. Pour de nombreux problèmes d'optimisation, on dispose d'algorithmes d'approximation avec de bons facteurs d'éloignement.

Pour conclure, les concepts théoriques de complexité algorithmique et de calculabilité permettent d'établir formellement les limites de l'informatique. Quand celles-ci rendent le prix de l'optimalité inabordable, les recherches peuvent se tourner vers des algorithmes d'approximation, afin d'obtenir de bonnes solutions en des temps très courts. Des chercheurs en informatique, et en particulier à l'UMONS, poursuivent des travaux de recherche dans cette thématique, afin de classifier les problèmes étudiés en fonction de leur difficulté « algorithmique » et de proposer de « bonnes » solutions algorithmiques quand cela s'avère possible. De telles recherches théoriques constituent un premier pas vers le développement d'applications pratiques ou industrielles. ■

- G. Ausiello et al., *Complexity and Approximation: Combinatorial Optimization Problems and Their Approximability Properties*, Springer, 1999
- T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, I*ntroduction to Algorithms*, McGraw Hill, 1997
- D. Harel, *Computers Ltd, What they really can't do*, Oxford University Press, 2004

Les récifs coralliens: des écosystèmes complexes à l'avenir incertain

» **Philippe GROSJEAN**, Laboratoire d'Écologie numérique des Milieux aquatiques (EcoNum), FS
Philippe.Grosjean@umons.ac.be

Les récifs coralliens tropicaux sont des écosystèmes extrêmement complexes qui n'ont pas fini d'étonner et de nous livrer leurs secrets les plus intimes alors même qu'ils sont en danger à très court terme. Le corail a des possibilités de calcification telles qu'il est capable de modifier le faciès de la croûte terrestre en y édifiant des récifs de plusieurs milliers de kilomètres de long. Mais cette machine vivante est menacée par l'acidification des océans, conséquence de l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pourquoi? Par quel mécanisme ? Les scientifiques tentent de le découvrir... avant qu'il ne soit trop tard!

Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines ont provoqué une augmentation de la teneur en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère jusqu'à 380 µatm, soit la valeur la plus élevée jamais atteinte depuis 420.000 ans. Cette augmentation est due à la combustion de charbon et d'hydrocarbures fossiles qui représentent, à l'échelle géologique, un piégeage du carbone terrestre et que l'homme relargue dans l'atmosphère en l'espace de quelques générations seulement. Ainsi, la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone pourrait bien atteindre ou dépasser 800 µatm à la fin du 21e siècle, soit un triplement de sa concentration préindustrielle.

L'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique a de nombreuses conséquences, dont toutes ne sont pas encore bien connues ou quantifiées. Sans entrer dans les polémiques autour de son possible effet d'augmentation de la température (le CO_2 est un gaz à effet de serre) qui ne fait pas l'unanimité, un autre de ses effets est, quant à lui, reconnu par l'ensemble de la communauté scientifique: l'acidification des océans suite à sa dissolution dans l'eau de mer. Ainsi, à la surface des océans, le pH de l'eau de mer a déjà baissé de 0,1 unité en moyenne et pourrait bien encore baisser de 0,3 à 0,4 unités d'ici 2100. Cela conduira probablement à des perturbations des organismes marins qui forment un squelette calcaire parce qu'une eau moins basique est moins favorable à la précipitation du carbonate de calcium dans ce squelette.

A l'origine des récifs coralliens, un animal considéré comme primitif dans « l'arbre phylogénétique » de la vie tout du moins : le « scléractiniaire », ou encore communément appelé corail. Un scléractiniaire forme des colonies de polypes ressemblant à de petites anémones de mer (il en est d'ailleurs un lointain parent) de parfois moins d'un millimètre de diamètre. L'une des caractéristiques les plus marquantes de ce polype est sa capacité phénoménale à précipiter le carbonate de calcium dissout dans l'eau de mer pour former un squelette dur calcaire. Ces squelettes s'accumulent à la mort des colonies pour former un socle corallien capable de modifier profondément le faciès des fonds océaniques. En effet, bien d'autres organismes marins sont capables de former des squelettes calcaires: certaines algues comme les corallines ou certains animaux, des mollusques ou les oursins, par exemple, nous y reviendrons. Alors, quelle est la particularité de ces scléractiniaires? Eh bien, elle tient dans la vitesse à laquelle ils sont capables de précipiter le carbone de calcium, qui en fait une véritable usine à constructions calcaires. L'équipe du laboratoire d'Écologie numérique des Milieux aquatiques (EcoNum) de la Faculté des Sciences de l'UMONS a mesuré, par exemple, des accroissements de squelette calcaire de ces scléractiniaires pouvant atteindre 1,5% en poids par jour. A ce rythme, et en l'absence d'érosion de ce squelette (ce qui n'existe pas dans la nature), une colonie peut facilement doubler le poids de son squelette en moins de deux mois!

De telles performances sont dues à une association - on parle de symbiose - entre le scléractiniaire et une « algue » minuscule, la zooxanthelle qui vit à l'intérieur même des tissus du corail. Le scléractiniaire procure un abris et une exposition optimale à la lumière aux zooxanthelles, et en échange, celles-ci produisent des photosynthétats qui fournissent l'énergie nécessaire notamment à la formation du squelette du corail. Ainsi, la calcification diurne, et donc, en présence de photosynthèse effectuée par les zooxanthelles, est jusqu'à quatre fois supérieure à la calcification nocturne pour une même colonie corallienne. De plus, les espèces de scléractiniaires qui ne font pas de symbiose avec les zooxanthelles calcifient beaucoup moins vite, à tel point qu'ils ne sont jamais considérés comme des acteurs significatifs de l'édification du récif corallien.

De part cette symbiose, les coraux sont également en concurrence avec les algues pour utiliser la lumière et les nutriments disponibles dans l'eau. En effet, une exclusion mutuelle est régulièrement observée: à partir d'un substrat rocheux solide propice au développement des coraux ou des algues, l'écosystème évolue soit vers un récif corallien où la quantité d'algues est restreinte (sauf certaines algues calcaires encroûtantes, les corallines, qui cohabitent bien avec les coraux), soit vers un champ d'algues où peu de coraux peuvent s'installer. Les situations intermédiaires ne sont souvent que des transitions en cours entre ces deux écosystèmes très différents.

Aujourd'hui, bon nombre de récifs coralliens semblent se transformer progressivement en champs d'algues. La rapidité de ces changements est en forte relation avec les perturbations d'origine anthropique autour des récifs qui sont malheureusement nombreuses: sédimentation à la suite de déboisement, pollutions par les engrais ou par les pesticides, destruction des coraux par l'ancrage sauvage ou les coups de palmes des plongeurs, surpêche qui réduit la quantité de poissons algivores. Ce sont autant de perturbations locales qui, heureusement, font l'objet d'une prise de conscience de plus en plus importante par les populations locales. Des mesures de protection des récifs coralliens sont entreprises

« En réalité, personne ne sait vraiment aujourd'hui quel sera exactement l'impact d'une élévation du CO_2 atmosphérique sur ces écosystèmes récifaux. »

partout, motivées par le désir de sauver ce patrimoine naturel, mais aussi pour les ressources économiques nombreuses qu'il génère: pêche, tourisme, ... L'atteinte due à la dissolution de dioxyde de carbone atmosphérique dans l'eau de mer est une perturbation supplémentaire, et probablement majeure, mais elle, d'origine planétaire. Les responsables principaux sont d'ailleurs les pays les plus industrialisés qui, pour beaucoup, vivent loin des récifs coralliens et sont donc moins enclins à prendre conscience des effets de leurs activités sur les coraux tropicaux.

En réalité, personne ne sait vraiment aujourd'hui quel sera exactement l'impact d'une élévation du CO_2 atmosphérique sur ces écosystèmes récifaux. Afin de situer la complexité de la question, il suffit de s'imaginer que la connaissance précise de ses effets sur chaque animal ou végétal du récif (ce qui est loin d'être le cas) ne donne même pas un début de réponse utilisable pour comprendre l'évolution de l'écosystème tout entier, tant les interactions sont nombreuses et déterminantes. Le CO_2 limite probablement la calcification des coraux. Mais il a été démontré qu'il peut également accroître la photosynthèse des algues ennemies des récifs coralliens... comme des zooxanthelles associées à ces mêmes coraux. Ajoutons à cela le rôle d'un des principaux brouteurs d'algues sur le récif: l'oursin. Cet animal forme aussi un squelette calcaire. Pour cette raison, il est également susceptible d'être affecté par l'augmentation du CO_2 dans l'eau. Et si les oursins régressent, est-ce que cela compromet les récifs en permettant aux algues de supplanter plus facilement les coraux?

Oui et non. Oui parce que le phénomène a déjà été observé à d'autres occasions, par exemple lorsqu'une maladie tue bon nombre d'oursins sur le récif. Non parce que l'oursin est également un bioérodeur. En broutant les algues sur le substrat calcaire, il en arrache de minuscules fragments, ce qui contribue à réduire en sable le socle corallien. Les coraux doivent calcifier plus en présence de nombreux oursins pour que ce socle corallien se maintienne ou grandisse. Tout est une question d'équilibre subtil en somme entre bioaccrétion (formation du socle calcaire) par les coraux et érosion (par les vagues, les tempêtes et cyclones... mais aussi tous les organismes qui broient, dissolvent ou minent le socle calcaire corallien, dont les oursins). De plus, comme si le tableau n'était pas encore assez complexe, ces mêmes oursins s'attaquent parfois directement aux coraux. Ce dernier comportement serait-il affecté par la teneur en CO_2 dans l'eau? Et si oui dans quel sens? Personne ne sait aujourd'hui.

Alors comment prédire l'avenir, même proche, des récifs coralliens en présence d'interactions multiples aussi complexes? Il n'est évidemment pas imaginable d'effectuer des expériences grandeur nature sur les récifs. Le pari lancé par le laboratoire EcoNum est de construire, et ensuite d'étudier des mini-écosystèmes récifaux artificiels... en aquarium. Des coraux, mais aussi des algues, des poissons récifaux, des oursins, des communautés diverses de bactéries sont "mises en scène" dans ces écosystèmes artificiels que l'on nomme mésocosmes. Ensuite, en faisant varier très très lentement la quantité de CO_2 dissout de manière contrôlée, les changements qui s'opèrent dans ces mésocosmes sont étudiés minutieusement et quantifiés. L'objectif ultime de cette approche est d'établir un modèle mathématique qui décrit les changements observés. Ce modèle pourrait alors ensuite être testé sur des récifs naturels pour voir si les changements déjà observés depuis le début de l'ère industrielle sont similaires. Ils pourraient également fournir des indications, avec toutes les précautions requises pour éviter d'extrapoler indument au milieu naturel, s'il y a lieu de craindre un renforcement de la tendance à la disparition des récifs coralliens de la surface de la terre dans une ou deux générations humaines, ou si ces écosystèmes possèdent des ressources encore insoupçonnées d'adaptation face aux grands changements climatiques de ces derniers siècles. En tout cas, nous ne pouvons qu'espérer que les coraux symbiotiques possèdent de telles ressources!

Résilience et mixité urbaine :
Une réponse à la complexité de la ville

» **Vincent BECUE[1], Damien SERRE[2], Youssef DIAB[2]**,1 FA+U, Université de Mons, 2 Université Paris-Est, EIVP
vincent.becue@umons.ac.be

Le développement des zones urbaines sur la planète, où l'espace est devenu une ressource de plus en plus rare, avec de forts déséquilibres sociaux et des destructions environnementales élevées, nécessite de guider l'évolution des systèmes urbains complexes tout en répondant aux enjeux du développement durable.

La ville durable est :
- **une ville résiliente, qui demande d'incorporer la gestion adaptative comme modèle d'apprentissage et de rétroaction pour faire face à l'incertain sur le territoire ;**
- **une ville diversifiée, qui protège la campagne et demande une réflexion sur la co-activité des fonctions et des usages afin de réussir une ville compacte et ainsi plus dense.**

L'année 2007 a été une année cruciale : 50% de la population mondiale vit désormais en milieu urbain (UN-Habitat, 2007). Ce palier atteint, il est attendu à ce que la population totale vivant en ville double dans les 30 prochaines années (United Nations, 2006). Ce taux de croissance équivaut à la construction d'une nouvelle ville d'un million d'habitants par semaine dans les 40 prochaines années (www.floodresilience-group.org, 2009). Cette croissance exponentielle pose à elle seule les enjeux liés à la maîtrise des risques et à l'étalement urbain. Or, cette urbanisation rapide s'accompagne, au mieux, d'incertitudes liées au changement climatique annoncé. Ce changement climatique, combiné à la concentration des biens et des personnes en milieu urbain, laisse présager des événements dévastateurs pour les années à venir. A titre d'exemple, le risque d'inondation devrait augmenter de manière significative : le coût éco-

nomique de ce risque devrait atteindre dans le monde la valeur de 100 milliards d'euros par an à la fin du siècle (European Environment Agency, 2008). Environ 75% de ces dommages seraient recensés en milieu urbain (COST22, 2008).

Risques urbains

À des aléas plus fréquents, plus intenses et une vulnérabilité accrue des systèmes urbains s'ajoute le fait que les sociétés modernes sont devenues aujourd'hui très sensibles aux risques et leur perception a été sensiblement modifiée. Le risque induit par les défaillances des réseaux urbains (transports, énergie, communication,) se situe à l'interface entre le risque naturel, lié aux aléas, et le risque technologique, lié aux ouvrages eux-mêmes : la défaillance d'un des réseaux urbains lors d'un événement fait partie de cette catégorie de risque dorénavant difficilement accepté par les populations et les politiques concernées puisqu'elle désorganise plus ou moins longtemps le système urbain. Par ailleurs, l'attractivité des villes et l'accroissement de la démographie ont abouti à autoriser la construction dans des zones potentiellement dangereuses comme des zones inondables, des zones sismiques,… Il résulte de ces phénomènes socio-naturels une vulnérabilité accrue non seulement aux événements extrêmes, mais aussi aux événements considérés comme courants par le passé.

Etalement urbain

Dans le même temps, les villes se sont développées selon le schéma de l'étalement urbain : celles-ci se sont expansées du centre vers la périphérie le long des grands axes routiers. Cet étalement est lié au phénomène de désurbanisation et s'est traduit par le développement de banlieues et de zones périphériques plus lointaines au détriment des villes centres avec des intensités variables selon les périodes. Le choix de la localisation des ménages est principalement déterminé par la possibilité d'emploi et la convivialité de l'environnement choisi tels que les espaces verts, les commerces, services ou transports en commun favorisant des lotissements toujours plus éloignés du centre-ville. Pour les activités économiques, ce sont des facteurs tels que la mobilité, le coût élevé de l'immobilier et le niveau de taxation locale qui poussent certaines entreprises à opter pour la périphérie ou les zones non urbaines. Elles s'installent dans des zones d'activités fermées sur elles-mêmes. Ce phénomène renforce la monofonctionnalité des zones périphériques et provoque l'étalement urbain.

Ces deux constats portent matière à réflexion. Comment gérer le risque ? Comment devancer ce gaspillage d'espace ? Comment fournir les bases d'une **théorie intégrée de l'organisation et de la complexité** ?

L'article s'élabore sur le constat que les outils et méthodes existants de la planification de projets urbains ne sont plus compatibles avec la complexité croissante du territoire, comme la ségrégation ou l'étalement urbain et la maîtrise des risques. En outre, plus les territoires urbains s'étendent et se complexifient, plus ils dépendent de leurs écosystèmes et plus ils deviennent vulnérables aux changements.

Notre recherche a pour objectif principal de proposer une méthodologie d'évaluation permettant aux acteurs de l'aménagement urbain d'évaluer leurs actions par rapport aux enjeux du développement durable pour orienter leur projet dans le sens de la mixité des fonctions urbaines et de la résilience. En effet, la méthode utilisée pour étudier un système est la double caractérisation par l'aspect structural et l'aspect fonctionnel. L'aspect structural correspond à l'organisation spatiale du système alors qu'à travers l'analyse fonctionnelle, il s'agit plus particulièrement de caractériser les phénomènes temporels : flux, échanges, rétroactions...

La complexité accessible

L'approche sectorielle de l'urbanisme correspond à la structuration classique des acteurs de la fabrication et de la gestion des villes ; elle permet de mettre en avant de bonnes pratiques comme par exemple la mise en œuvre de solutions performantes de mobilité, de gestion des eaux ou encore énergétiques d'un projet urbain. Intéressantes en soi, celles-ci ne doivent cependant pas constituer la stratégie politique et décisionnelle occultant les démarches systémiques intégrant la complexité et les nombreuses composantes de la ville.

Les bonnes pratiques et les formes de conseil «technique» de l'aménagement urbain sont aujourd'hui limitées par une sectorisation forte que déterminent les spécialisations : énergie,

Fig. 1 : Inondations à Orléans (agglomération d'Orléans).

transports, environnement, sociologie, …. Elles mettent en jeu des expertises verticalisées et insuffisamment connectées qui ne prennent pas en compte l'interdépendance des éléments, des relations et des actions de transformation constituant un système urbain. L'objet « ville », jusque tout récemment, était systématiquement abordé par des méthodes très analytiques, caractérisées par le cloisonnement des études et rares sont les tentatives de croisement de ces différentes approches dans une perspective transversale appréhendant la complexité.

L'analyse de l'aménagement urbain a ainsi souligné l'importance du passage d'une vision linéaire à un urbanisme intégré visant un système inter-relié traitant la ville comme un objet complexe susceptible d'être envisagé sous un angle systémique. La systémique est intrinsèquement liée à la prise de conscience de la complexité croissante de la ville.

L'approche systémique est une façon d'interpréter le monde réel. Elle permet d'émettre des hypothèses sur l'organisation des villes en supposant des critères qui composent la structure fonctionnelle de la ville. Structure et fonction sont donc deux concepts inséparables intégrant la mixité et la résilience urbaine.

Cela demande une évaluation globale et transversale développant la relation de critères, et capables de juger de la faisabilité d'un projet autour de stratégies de résilience et de mixité urbaine. Résilience et mixité urbaine sont les deux mots formant la particularité d'une situation complexe.

Organiser la ville complexe au travers des concepts de mixité et de résilience

Le concept de résilience est devenu en quelques années le concept central de la gestion des risques, notamment dans les pays anglo-saxons.

A l'origine, le terme de résilience fait référence à une propriété physique : « la capacité pour un matériau à retrouver son état initial à la suite d'un choc ou d'une pression continue » (Essai de Charpy) (rapport, exprimé en joules par cm², de l'énergie cinétique absorbée qui est nécessaire pour provoquer la rupture d'un métal à la surface de la section brisée). Puis, toujours dans le domaine de la physique, un système est résilient « s'il perdure malgré les chocs et perturbations en provenance du milieu interne et/ou de l'environnement externe » (Vickers 1965). En psychologie, Boris Cyrulnik, définit la résilience comme un « traumatisme maximum que peut subir un individu avant de se reconstruire ». Puis, dans le domaine de l'écologie, la question majeure, à laquelle il fallait répondre pendant les années 70 et 80, était de définir la durabilité ou la persistance d'un écosystème complexe. C'est dans ce cadre qu'en 1973, Holling, a introduit le concept de « systèmes résilients ». Holling définit alors la résilience comme « l'importance d'une perturbation qu'un écosystème peut encaisser sans changer de structure ». Il introduit dans le concept de résilience la durée de retour (Dauphiné, 2003). Enfin, dans le domaine de l'économie (Paquet, 1999) parle de « la capacité intrinsèque des entreprises, des organisations et des communautés à retrouver un état d'équilibre » : la résilience serait la clé de la durabilité.

Nous nous intéressons à la capacité de la ville à s'adapter à une nouvelle donne environnementale à travers l'évaluation de la résilience urbaine face à divers scénarios de sollicitations (de type risques) du système urbain. Dans le domaine de la résilience urbaine on parle de « la capacité d'une ville à faire face à un événement dévastateur avec le minimum des dommages possibles » (Campanella 2006). En fixant la résilience comme fondement.

La résilience est donc une aptitude des systèmes à faire le bilan des enjeux encourus par les systèmes, l'aptitude à faire face à ces enjeux et l'aptitude à les reconfigurer.

Fig. 2 : Ville de Francfort : aménagement d'un nouveau quartier en zone inondable avec prise en compte du risque

La fin du zonage : assumer la complexité du territoire par un urbanisme de projets

Aux différents niveaux d'échelle de planification se pose la question des outils pour intégrer le concept de résilience et fabriquer la mixité fonctionnelle. Car on ne peut plus s'appuyer seulement sur des plans de zonage et des réglementations, il faut développer des outils efficaces dans les processus urbains actuels.

À de nombreuses reprises, les différents plans de zonage prônent la mixité des fonctions urbaines en cherchant à faciliter l'intégration des implantations des activités dans les tissus urbains respectifs mais les documents de planification urbaine, tels que schéma et plan sont inappropriés pour maîtriser les risques urbains et pour réussir une ville résiliente et diversifiée. A l'échelle de l'agglomération, les schémas apparaissent comme référence lointaine dès lors que le projet urbain se situe au niveau de l'action. En effet, les schémas directeurs intègrent de grandes orientations et des notions de mixité difficiles à appliquer à l'échelle du projet. A l'échelle locale, les plans de zonage donnent des pistes de réflexion mais ne montrent pas comment les mettre en œuvre.

Fig. 3 et 4 : Dublin : vue aérienne de l'avancement de la ville dans la zone inondable

Fig. 5 : Identification de mille projets en gestation sur le territoire (Equipe Rogers, Grand-Paris)

LE SYSTÈME ÉDUCATIF : UN SYSTÈME COMPLEXE QUE L'ON PEUT MODÉLISER

» Nathanaël Friant[1], Sabine Soetewey[1], Marc Demeuse[1], Jonathan Hourez[2] et Jef Wijsen[2], 1 FPSE, Institut d'Administration Scolaire, 2
inas@umons.ac.be ; jonathan.hourez@umons.ac.be ; jef.wijsen@umons.ac.be

Notre système éducatif est compliqué, mais est-ce un système complexe ? Oui, selon une équipe de recherche pluridisciplinaire de l'UMONS, qui adopte ce point de vue pour étudier la formation de ségrégations scolaires et développer des outils aidant les gestionnaires du système éducatif à prendre des décisions. Pour ce faire, les chercheurs développent une modélisation multi-agents et effectuent des simulations pour prévoir les effets de différents scénarios.

L'étude du fonctionnement du système éducatif de la Communauté française de Belgique pose aux chercheurs de nombreux défis. D'une part, ce système laisse une grande liberté de choix aux élèves ou à leurs parents, notamment en ce qui concerne l'établissement scolaire fréquenté. D'autre part, on assiste à une séparation des publics scolaires selon leur milieu socio-économique et leurs performances académiques : certaines écoles concentrent des publics favorisés, alors que d'autres, parfois qualifiées d'écoles-ghettos, concentrent les élèves les plus défavorisés[1].

Or, la formation de ségrégations socio-économiques au niveau du système éducatif est particulièrement contre-productive, notamment parce que les difficultés scolaires sont statistiquement liées au milieu socio-économique d'origine et que la concentration d'élèves en difficulté au sein d'une même école a un effet délétère sur leurs performances scolaires : les élèves perdent beaucoup à être scolarisés dans une école concentrant des élèves peu performants, alors que, à l'inverse, ils gagnent à côtoyer un public hétérogène.

La lutte contre les ségrégations scolaires, au départ d'une situation de liberté des acteurs dans le système, fait dès lors l'objet d'une attention particulière de la part des décideurs politiques. C'est pourquoi il est primordial pour les chercheurs de comprendre la formation de ces ségrégations : il s'agit d'un enjeu essentiel pour décider de l'avenir du système éducatif.

Le système éducatif : un système complexe

Classiquement, le phénomène des ségrégations scolaires est abordé sous l'angle d'un déterminisme d'ordre sociologique (voir par exemple les travaux de Bourdieu et Passeron)[2]. Si cette approche présente un intérêt certain, l'approche de la complexité systémique ouvre d'autres perspectives, à explorer en parallèle. Elle consiste à voir notre système éducatif comme un système complexe, composé d'un grand nombre d'acteurs interagissant entre eux. Résultant de ces interactions, des propriétés, souvent inattendues,

[1] Demeuse, M., & Baye, A. (2008). Mesurer et comparer l'équité des systèmes éducatifs en Europe. *Education & Formations*, (78), 137-149. En ligne: http://media.education.gouv.fr/file/revue_78/56/7/11_38567.pdf
Littré, F., Demeuse, M., Derobertmasure, A., Friant, N., & Nicaise, I. (2009). Briser les murs : rompre avec la ségrégation dans l'enseignement. In I. Nicaise, E. Desmedt, & M. Demeuse, *Une école réellement juste pour tous !* Waterloo : Plantyn.

[2] Bourdieu, P., & Passeron, J. C. (1970). *La reproduction: éléments pour une théorie du système d'enseignement*. Paris: Minuit.

émergent du système. La ségrégation socio-économique observée entre écoles peut être ainsi perçue comme l'un de ces phénomènes émergents. Cette manière d'envisager les choses permet à la fois de prendre en compte la liberté des individus et d'ouvrir la voie à une action au niveau des mécanismes menant à des ségrégations.

Une approche pluridisciplinaire pour relever le défi

C'est cet angle de la complexité que nous adoptons au sein d'une équipe de recherche pluridisciplinaire (sciences de l'éducation et informatique) travaillant sur une recherche commanditée par le réseau d'enseignement de la Communauté française de Belgique. Le but de cette recherche consiste, entre autres, en la conception d'un outil d'aide à la décision politico-administrative dédié à la gestion du système éducatif.

Afin d'illustrer les besoins en termes d'aide à la décision, prenons l'exemple de la situation bruxelloise. Les projections de population pour Bruxelles indiquent clairement la nécessité d'y créer de nouveaux établissements d'enseignement[3]. Dans le même temps, la structure socio-économique fortement hétérogène de cette ville-région laisse entrevoir la complexité des choix à poser si on ne souhaite pas accroître « l'effet ghetto » dans les établissements scolaires. Or, tout changement dans un système complexe produit des effets que l'on ne peut facilement prédire à l'avance, tel qu'un accroissement des effets de ségrégation. Il est dès lors essentiel de chercher à estimer ces effets par le développement d'outils d'aide à la décision.

L'apport des systèmes multi-agents

Pour aider à la décision dans un tel environnement, les simulations sont un outil précieux, car elles seules permettent de prévoir les effets d'un changement dans un système complexe. Il s'agit d'une démarche qui consiste à réaliser une représentation simplifiée d'un système réel (un modèle) afin d'en comprendre le comportement et/ou d'en prévoir l'évolution à travers le temps, soit à politique constante, soit lorsque l'on fait varier certains paramètres.

« Les projections de population pour Bruxelles indiquent clairement la nécessité d'y créer de nouveaux établissements d'enseignement »

Parmi les différents types de simulation, l'approche individu-centrée correspond particulièrement bien à l'étude de la formation des ségrégations dans notre système éducatif. Dans ce cas, le modèle porte directement sur les individus (niveau micro) et la simulation du fonctionnement de l'ensemble de ces individus provoque l'émergence de phénomènes au niveau du système (niveau macro).

Les systèmes multi-agents proposent de représenter directement un système complexe par un ensemble d'agents évoluant dans un environnement commun. Un agent est, dans ce cas, une entité autonome qui a la capacité de percevoir les caractéristiques de son environnement, d'y agir, d'interagir avec les autres agents présents, de réagir à temps aux changements qui se produisent dans son environnement, mais également de prendre l'initiative pour atteindre ses objectifs propres[4].

Modélisation et simulation de notre système éducatif

Nous nous attelons ainsi à modéliser notre système éducatif sous la forme d'un système multi-agents, en se basant sur les données collectées au niveau des élèves par le système éducatif lui-même. Ces données sont

[3] Dehaibe, X. (2010). Impact de l'essor démographique sur la population scolaire en Région de Bruxelles-Capitale. *Les cahiers de l'IBSA*,2, 1-40.

[4] Bourdieu, P., & Passeron, J. C. (1970). *La reproduction: éléments pour une théorie du système d'enseignemen*t. Paris: Minuit.

tout d'abord analysées grâce à des outils de Data Mining afin de modéliser les choix des élèves en termes d'établissements. Cette modélisation prend la forme d'arbres de décisions permettant d'affecter un établissement à un élève en fonction de certaines conditions.

Dans un second temps, un système multi-agents est créé, en utilisant un outil de simulation. Chaque élève est représenté dans le modèle par un agent, placé dans une représentation précise de son environnement (la région de Bruxelles-Capitale, par exemple). La figure 1 illustre ce système multi-agents. L'environnement correspond à une cartographie de la région étudiée, reprenant les domiciles des élèves par secteurs et les positions des établissements scolaires. Il peut être étoffé par l'ajout de variables permettant d'affiner la représentation : les lignes de transports en commun, le niveau socio-économique, les options proposées par les établissements, la capacité d'accueil des établissements… Chaque agent est, quant à lui, défini par les règles de choix auxquelles il obéit statistiquement, et qui vont déterminer, à chaque unité de temps, les choix qu'il va poser. La simulation consiste alors à représenter l'évolution moyenne du système éducatif à travers le temps. La figure 2 illustre l'évolution d'un système après un temps t. Afin de valider le modèle, les résultats sont comparés avec les données réelles du système éducatif.

A partir de cette modélisation du système éducatif, d'autres simulations sont effectuées en faisant varier certains paramètres. La modification d'un élément de l'environnement aura un impact sur les choix posés par l'ensemble des agents (voir figure 3). Les modifications de choix peuvent, à leur tour, modifier les propriétés émergentes et donc l'évolution du système. La modification des paramètres du modèle sous différentes hypothèses permet d'observer l'évolution potentielle moyenne du système éducatif modifié. Des scénarios alternatifs par rapport à une décision à prendre peuvent ainsi être testés et analysés afin d'en estimer les différents effets avant une application concrète sur le terrain. Ces scénarios donnent une vision prospective qui permet d'éclairer et de soutenir les décisions prises au niveau de la gestion du système éducatif.

Travail en cours

A l'heure d'écrire ces lignes, notre travail est loin d'être terminé. Le lecteur intéressé ne trouvera donc pas ici une présentation des résultats de la recherche. Il pourra par contre stimuler son imagination sur la base du problème concret de la situation bruxelloise : ouvrir de nouveaux établissements scolaires, oui, mais où ? Dans les trois zones critiques, identifiées par l'Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse, où le manque d'écoles sera le plus grand ? Compte tenu de ce que l'on sait des mécanismes de choix d'établissement scolaire, ce changement, illustré par la figure 3, accroîtra-t-il encore le problème des ségrégations scolaires à Bruxelles, ou le diminuera-t-il ? C'est à ce type de questions que notre démarche entend répondre.

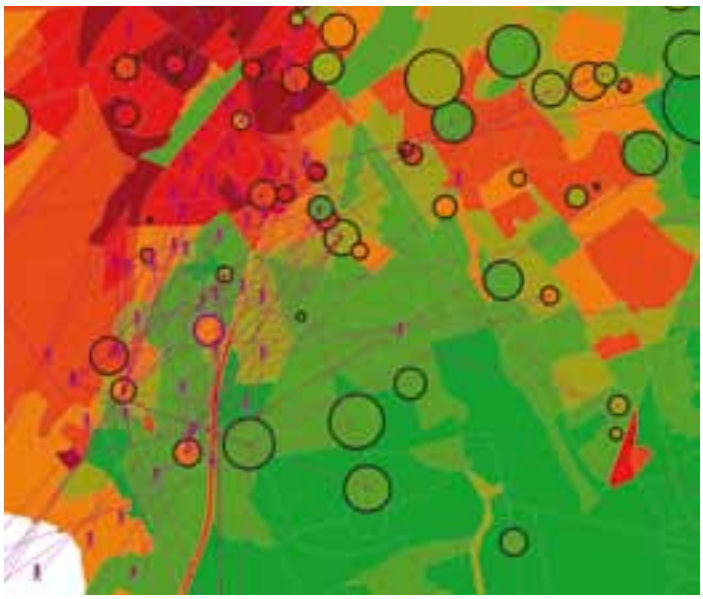


Fig. 1

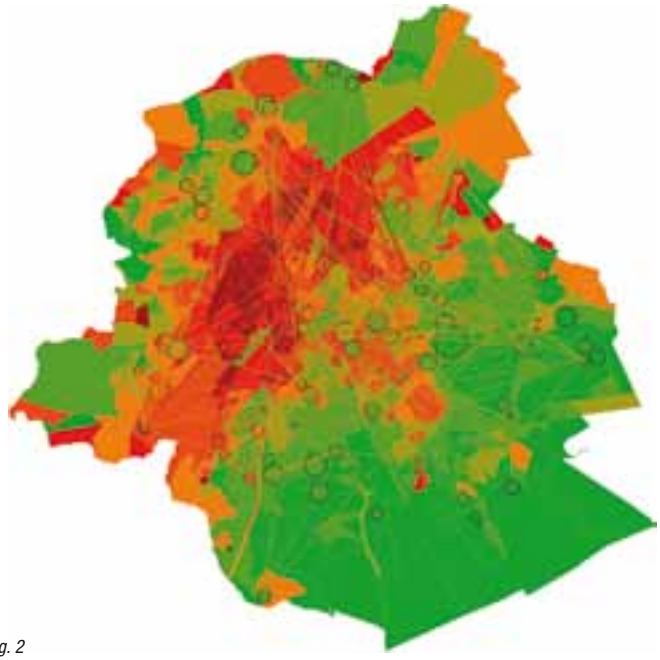


Fig. 2

Fig. 3

LA COMPLEXITÉ LOGICIELLE

» **Tom MENS** & **Mathieu GOEMINNE**, Service de génie logiciel, Institut d'informatique, FS
tom.mens@umons.ac.be, http://informatique.umons.ac.be/genlog/

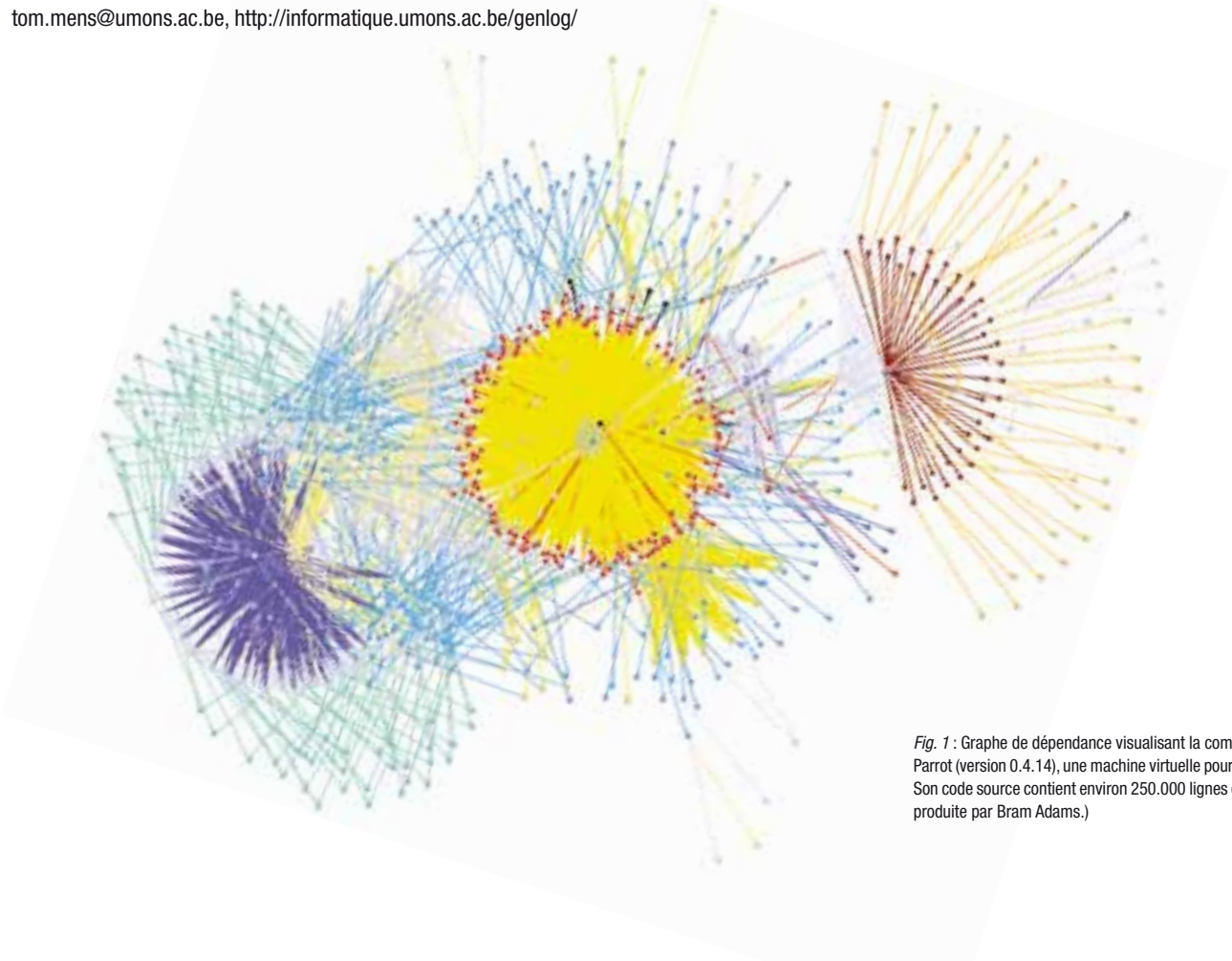


Fig. 1 : Graphe de dépendance visualisant la complexité du logiciel Parrot (version 0.4.14), une machine virtuelle pour le langage Perl 6. Son code source contient environ 250.000 lignes de code C. (Image produite par Bram Adams.)

Les systèmes logiciels sont parmi les systèmes les plus complexes que l'Homme ait jamais fabriqués. Des chercheurs tentent de mesurer, comprendre et analyser cette complexité dans le but de fournir des outils automatisés permettant de contrôler voire de réduire cette complexité.

Les systèmes logiciels modernes sont très complexes et ont une taille énorme. Par exemple, la taille de deux systèmes d'exploitation très connus, Windows et Linux, mesurée en nombre de lignes de code source, correspond à quelques dizaines voire centaines de millions de lignes. Une raison de cette complexité est que, contrairement à un bâtiment, un pont, ou une voiture, aucune pièce ne se ressemble. L'effort et le coût pour développer de tels systèmes sont astronomiques : le travail de plusieurs centaines de développeurs pendant plusieurs années est nécessaire, pour un coût total de plusieurs centaines de millions d'euros.

Pour aggraver les choses, le nombre de bugs (défauts de conception présents dans le logiciel) est proportionnel à la taille du produit logiciel : plus le logiciel grandira, plus il y aura de bugs. Ces bugs sont inévitables, car le développement logiciel est un processus qui nécessite une grande expertise, ainsi que beaucoup de réflexion, d'attention et de concentration. De plus, les produits logiciels ne cessent d'évoluer suite aux demandes des clients et du marché informatique. Chaque demande de changement engendre des modifications dans le logiciel, rendant ce dernier logiciel encore plus complexe, ce qui augmente encore la probabilité d'introduire de nouveaux bugs.

Les informaticiens, et les programmeurs en particulier, doivent donc faire face à des critères contradictoires pour répondre aux besoins des clients : ils doivent créer ou faire évoluer un produit logiciel le plus rapidement possible, et à un coût réduit, sans compromettre sa qualité. Il est clair que ceci constitue un défi majeur qui n'est pas réalisable sans avoir recours à des techniques et outils automatisés aidant les programmeurs dans leurs tâches quotidiennes.

Nos travaux de recherche

Les chercheurs du Service de Génie Logiciel (SGL) de la Faculté des Sciences de l'UMONS, en étroite collaboration avec plusieurs chercheurs étrangers, étudient cette problématique dans le cadre d'une Action de Recherche Concertée sur l'ingénierie logicielle dirigée par les modèles, un projet FNRS sur l'adaptabilité logicielle financé par le fonds FRFC, et un projet « Objectif de Convergence » sur l'ingénierie et la qualité des systèmes, co-financé par le fonds européen FEDER et la Région wallonne. Dans le cadre de leurs travaux, ils étudient plusieurs techniques permettant de mesurer, contrôler et réduire la complexité logicielle.

Les métriques logicielles permettent de mesurer différents aspects de la qualité d'un produit logiciel, dont sa complexité. Une analyse statistique de l'évolution de ces métriques au fil du temps (pour chaque nouvelle version du produit logiciel) permet de vérifier si la complexité d'un logiciel augmente ou diminue, et cette information peut être utilisée par le développeur du produit pour réagir de manière adéquate. Une métrique assez répandue pour déterminer la complexité du code source est la complexité cyclomatique, proposée par McCabe en 1976. Elle est basée sur la notion du nombre cyclomatique en théorie des graphes. Si on considère le graphe de flux de contrôle (une représentation abstraite du code source), la complexité cyclomatique indique le nombre de chemins indépendants qu'on peut emprunter pour exécuter le code. Plus il y a de chemins, plus un développeur a de difficultés à comprendre et modifier le produit logiciel. La complexité logicielle peut également être calculée sur base de son code exécutable en mesurant les ressources matérielles (p.ex. mémoire et espace disque utilisés, nombre de cycles du processeur consommés) nécessaires pour exécuter le logiciel. Finalement, la visualisation logicielle vise à représenter de manière visuelle la structure et la complexité du produit logiciel, afin d'en donner un aperçu global, et permettant au développeur de tirer des conclusions ou de naviguer plus facilement dans le code source. La Figure 1 ainsi que la Figure 2 illustrent cette idée, en utilisant deux types de visualisation assez différents.

L'ingénierie logicielle dirigée par les modèles (IDM) a pour objectif de créer et d'utiliser des langages de modélisation à un niveau d'abstraction beaucoup plus élevé que le code source. Cela permet aux utilisateurs et développeurs d'exprimer leurs besoins et problèmes selon différents points de vue en utilisant des langages visuels dédiés, spécifiques à un contexte ou domaine d'applications particuliers. Des outils permettent alors d'exécuter les modèles, ou de générer le code source correspondant aux modèles. Un des défis majeurs consiste à faire face à l'évolution des modèles logiciels. Tout comme le code source, les modèles subissent de nombreuses modifications au fil du temps. Ces modifications introduisent des incohérences qui doivent être détectées et résolues de manière automatique ou interactive. Pour cela, des techniques et approches formelles provenant de la logique mathématique et de l'intelligence artificielle sont actuellement étudiées par les chercheurs du SGL.

De nouveaux processus de développement permettent de produire des logiciels de manière plus efficace. Des exemples assez connus sont les méthodes agiles et les processus de développement libres et open source. Pour comprendre comment un tel processus affecte l'évolution de la complexité et de la qualité d'un produit logiciel, il ne suffit pas de se contenter d'analyser seulement le code source. Il faut étudier tout l'écosystème entourant le produit, c'est-à-dire tous les artéfacts créés et utilisés pendant le processus de développement (p.ex. la documentation, les tests, le cahier de charges), ainsi que toutes les parties prenantes impliquées dans ce processus (p.ex. les utilisateurs, développeurs et gestionnaires). Le défi scientifique consiste à analyser ces différentes sources constituant une énorme quantité de données, et d'en extraire ce qui est pertinent et essentiel pour mieux comprendre l'évolution logicielle. Pour ce faire, les chercheurs du SGL ont recours à des techniques venant de la statistique et du domaine de data mining.

Finalement, l'analyse des systèmes logiciels peut se baser sur d'autres disciplines de recherche, comme celle de la dynamicité des systèmes (en anglais: « system dynamics »). Elle vise à caractériser et simuler les systèmes dynamiques, c'est-à-dire les systèmes dont les composants interagissent entre eux selon un mécanisme de rétroaction conditionné par des délais temporels. Plusieurs mécanismes, comme les équations différentielles, sont étudiés pour modéliser de tels systèmes. Un écosystème logiciel peut facilement être considéré comme un système dynamique, l'analyse de l'évolution des systèmes logiciels peut alors bénéficier de ces travaux de recherche. ■

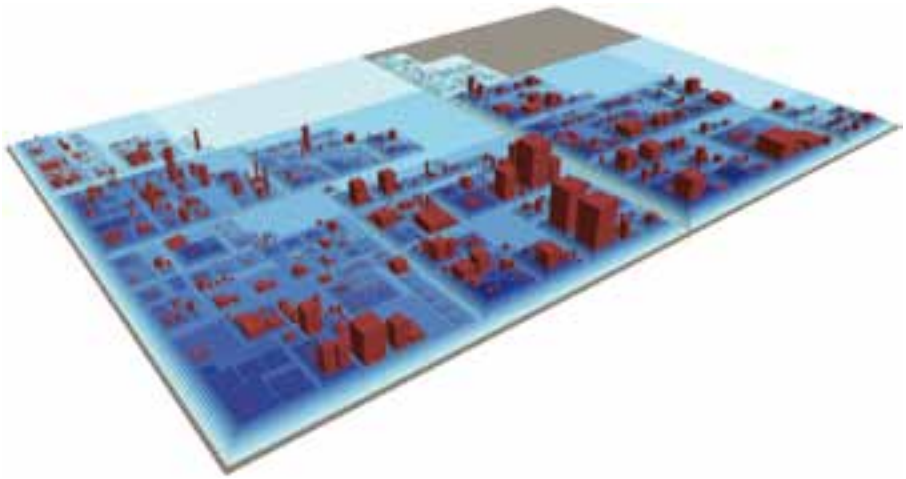


Fig. 2 : Visualisation 3D de la taille et la structure d'un produit logiciel, en utilisant l'analogie d'une ville : à chaque entité du logiciel correspond une boite rectangulaire. Ses hauteur, largeur et profondeur correspondent chacune à une valeur reflétant la complexité de cette entité.

Pour en savoir plus :

- T. Mens, D. Tamzalit, M. Hoste, J. Pinna Puissant (2010) Amélioration de la qualité de modèles: Une étude de deux approches complémentaires. Revue des Sciences et Technologies de l'Information – Série Technique et Science Informatiques, 29(4-5) 571-599
- J. Fernandez-Ramil, D. Izquierdo-Cortazar, T. Mens (2009) What does it take to develop a million lines of open source code? Proc. International Conference on Open Source Systems.
- T. Mens, S. Demeyer (2008) Software Evolution. Springer
- T. Mens, J. Fernandez-Ramil, S. Degrandsart (2008) The Evolution of Eclipse. Proc. International Conference on Software Maintenance, IEEE
- A.H. Eden, T. Mens (2006) Measuring software flexibility. IEE Proceedings Software, 153(3) 113–125

2000 - 2010

MATERIA NOVA ET MULTITEL : déjà 10 ans à la pointe de la recherche

» **Valéry SAINTGHISLAIN**, service Communication et Relations Publiques
Valery.saintghislain@umons.ac.be

© Denis Lécuyer

Fin novembre, les ASBL Materia Nova et Mutlitel ont célébré leur dixième anniversaire en présence du ministre Jean-Marc Nollet, en charge de la Recherche au sein du Gouvernement wallon. A cette occasion, des visites guidées étaient organisées dans les différents labos à destination des PME et des décideurs. « Plusieurs raisons nous ont conduits à commémorer cet événement, explique Calogero Conti, Recteur de l'UMONS et président de Materia Nova. D'abord, il y a l'intention de mieux faire connaître les dizaines d'activités de pointe développées par l'Université et qui constituent des axes forts de sa recherche. Ensuite, il y a également le souci d'illustrer de façon concrète le rôle que l'UMONS peut jouer dans ses missions de services à la société ».

Si la création des deux ASBL remonte à 2000, les activités des deux centres, étroitement liés à l'Université de Mons et, historiquement, à l'ex UMH et à la Faculté Polytechnique, remontent au démarrage du programme Objectif 1, dans les années 1994-1995. Depuis, ils ont massivement bénéficié du soutien financier de l'Union européenne et de la Région wallonne. Si bien que l'on peut estimer qu'aujourd'hui, près de 20 millions d'euros chez Materia Nova et 9 millions d'euros chez Multitel ont été investis tant en infrastructures qu'en équipements.

Materia Nova, comme son nom l'indique, est spécialisé dans le développement de matériaux nouveaux et de technologies environnementales (chimie verte, de surface, des polymères, électronique plastique, caractérisation des matériaux…). Multitel déploie quant à lui ses activités de recherche essentiellement dans les domaines des télécommunications, du traitement du signal et de l'image.

Une soixantaine de chercheurs hautement qualifiés travaillent au quotidien chez Multitel tandis qu'ils sont près de quatre-vingts à être affectés chez Materia Nova (voir chiffres clés ci-contre). Tous mettent leur savoir-faire scientifique aux services de la recherche mais aussi des entreprises, PME et multinationales, qui font appel à eux pour le développement de brevets ou la mise au point de produits innovants.

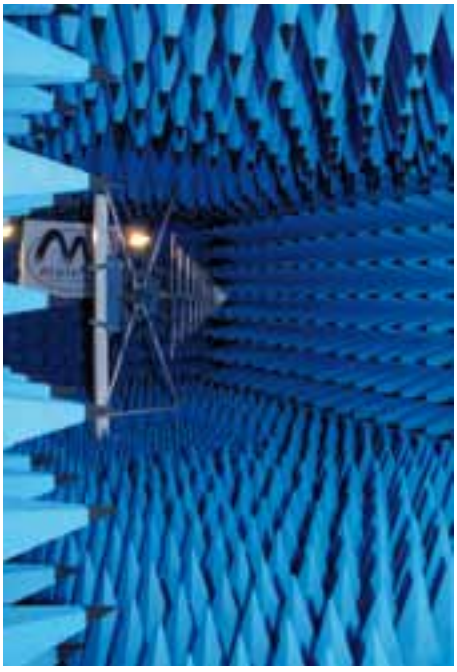
MATERIA NOVA EN CHIFFRES

- Près de 80 chercheurs spécialisés dans les domaines complémentaires tels que:
  - la chimie,
  - la physique,
  - la biologie.
- 18 millions d'investissements consentis dont :
  - 6,1 millions pour le bâtiment (financé à 100% par la RW et le Fonds Feder de l'Objectif 1)
  - Près de 12 millions pour les équipements de recherche:
    - 7,1 millions via les fonds Objectif 1 (1994-1999)
    - 2,2 millions via les fonds Phasing out (2000-2006)
    - 2,6 millions via les fonds Convergence (2007-2013)
    - 6,2 millions d'euros de budget annuel de fonctionnement
- En 10 ans :
  - 10.000 « contacts » entreprises
  - 2.000 contrats et prestations d'expertise
  - 10 contrats européens (sans cofinancement)
  - 600 publications et communications scientifiques
  - Des dizaines de brevets déposés comme co-inventeurs

Plus d'infos via www.materia-nova.com

« Multitel est actif dans la photonique, le traitement du signal, de l'image et de la parole, dans la cryptographie ou encore la certification, y compris ferroviaire », détaille son président, Serge Boucher. Dans le secteur de la fibre optique, François Narbonneau, ingénieur de recherche, a mis au point un équipement médical qui permet de mesurer la respiration d'un patient anesthésié subissant une IRM. « Il faut savoir, dit-il, que l'IRM fonctionne grosso modo comme un four micro-ondes. On ne peut donc y utiliser de parties métalliques ou de composants conducteurs. Le recours à la fibre optique permet, lui, une utilisation dans tous les milieux à risque ».

Le centre Multitel a également investi dans l'aménagement d'une chambre anéchoïque (ou « sourde ») qui permet de calibrer et de caractériser les équipements électroniques. Il s'agit d'une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques, évitant ainsi tout écho pouvant perturber les mesures. « Cette chambre supprime les échos liés à la propagation, au rayonnement de radiofréquences », confirme Emmanuel Fernandes, ingénieur-chercheur. Elle permet de mesurer l'effet parasitaire des équipements électroniques développés chez Multitel ou dans les sociétés partenaires.



Une nouvelle spin-off est actuellement en cours de création. Elle s'appellera M2PHOTONIX et développera ses propres lasers, leur permettant ainsi de répondre à des demandes très spécifiques et de garantir une grande flexibilité.

A deux pas de là, dans les bâtiments de Materia Nova, les chercheurs travaillent au développement de nouveaux matériaux et de technologies environnementales innovantes. « Dans le domaine des revêtements de surface, nous travaillons avec de grands groupes verriers sur l'élaboration de vitrages à basse émissivité par exemple. Mais nous sommes également actifs dans la mise au point de couches optiques électroniques, utilisées par exemple dans les cellules photovoltaïques », résume Luc Langer, le directeur général.

Materia Nova travaille aussi sur les nanocomposites et les biopolymères. Le plus bel exemple d'un produit mis au point dans ses locaux est sans doute le célèbre tapis rouge qui orne les marches du festival de Cannes et réalisé à partir de… betteraves ! « Nous travaillons aussi à l'élaboration de nouvelles couches anti-corrosion plus respectueuses de l'environnement et appelées à remplacer le chrome hexavalent, nocif pour la santé, embraye Rony Snyders, directeur scientifique. Ce nouveau revêtement permet une auto-cicatrisation des tôles qui auraient été griffées ».

Materia Nova dispose également d'équipements de pointe comme cette machine, le XPS, capable d'effectuer des nanoforages dans la surface des matériaux afin d'en déterminer la composition. Ces carottages microscopiques sont de l'ordre de dix nanomètres, soit l'équivalent d'un 1.000e de diamètre d'un cheveu ! « Si nous voulons analyser les matériaux sur des surfaces plus élevées, il faut en arracher des couches microscopiques que l'on peut alors analyser successivement », explique M. Synders. Cet outil est mis à disposition des entreprises qui en font la demande.

« Materia Nova conclut de plus en plus de contrats bilatéraux en dehors de la Wallonie et du pays. De plus en plus de sociétés implantées en Angleterre, en Italie, en France ou au Portugal font appel à nos services. Même en dehors de l'Europe ! », se réjouit Luc Langer. ■

MULTITEL EN CHIFFRES

- Près de 55 chercheurs qualifiés
- Cinq sociétés spin-off créées + une 6e en préparation
- Près de 9 millions d'euros d'investissements consentis en 10 ans dont:
  - Pour le bâtiment: 3.360.100 euros ventilé comme suit:
    - 1.285.050,12 euros du Feder
    - 1.285.050, 12 euros de la Région wallonne
    - 25% sur fonds propres.
  - Pour les équipements :
    - 500.000 d'euros investis par an, soit grosso modo 5 millions d'euros depuis 2000
    - 5 millions d'euros de budget annuel de fonctionnement
- En 10 ans :
  - Environ 5.900 « contacts » en entreprises.
  - Des dizaines de partenariats conclus avec de nombreux centres de recherche et universités de renommée à l'échelle nationale et internationale.
  - Plus de 950 contrats signés avec l'industrie et les entreprises depuis la création du centre.
  - Plus de 30 contrats européens obtenus depuis le lancement du 5e programme-cadre européen (« Framework Programme 5 »).

Plus d'infos via www.multitel.be

Vous informer à l'UMONS

Portes Ouvertes 2011

À Mons

- le samedi 19 mars, de 9h à 12h30 (visites de laboratoires et services) sur les quatre campus - Archi, Polytech, Sciences, Warocqué
- le samedi 7 mai, de 9h à 12h30 (matinée d'information) sur les quatre campus
- le samedi 25 juin, de 9h à 12h30 (1er jour des Inscriptions)

À Charleroi

- mercredi 4 mai, de 14h à 18h

Journées spécifiques

Faculté Polytechnique

- Journée « Etudiant d'un jour en Polytech » : jeudi 10 mars 2011
- Journée « Sciences en fête, faites des sciences »: mardi 29 mars 2011
- Stages FPMs-Jeunes : 12 au 14 avril 2011
- Exposition « Du mammouth à l'agriculture : l'Homme préhistorique dans son environnement » : du 4 mars au 26 juin 2011 (Espace Terre et Matériaux)

Faculté des Sciences

- Journée Math/Sciences : 31 mars 2011

Faculté Warocqué d'Economie et Gestion

- Journées de la Gestion :
  Mons : mardi 5 avril 2011
  Charleroi : jeudi 7 avril 2011

Vous préparer à l'UMONS

- Accueil rhétos : du 7 au 11 mars 2011 (congés de carnaval)
- Franchir le cap : les 31 août, 1er et 2 septembre 2011
- Cours introductifs : 5 au 9 septembre 2011
- Préparation à l'examen d'admission en Polytech :
  Mons - Charleroi - Tournai

1ère session	:	les mercredis 6 et 27 avril et les mercredis 4, 11 et 18 mai 2011
2ème session	:	du 17 au 19 août 2011

Plus d'infos:

www.umons.ac.be

UMONS
Université de Mons

2011, Année Internationale de la Chimie

» **Roberto Lazzaroni, Francesco Lo Bue, Didier Villers,**
Faculté des Sciences, Institut de Chimie et Carré des Sciences
roberto.lazzaroni@umons.ac.be

IYC 2011
International Year of CHEMISTRY

C'est une tradition au niveau des Nations Unies, chaque année est une occasion de célébrer une grande discipline ou un grand pôle scientifique. Il en fut ainsi au cours de la décade écoulée pour la biodiversité, l'Astronomie, la Physique, les mathématiques, ... À l'initiative conjointe de l'UNESCO et de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), l'année 2011 a été proclamée « Année Internationale de la Chimie ». Des activités à l'échelle nationale ou internationale émailleront cette année, avec l'objectif d'améliorer la compréhension et la perception de la chimie par le public et de promouvoir la contribution de la chimie face aux défis du troisième millénaire (développement durable, besoins en énergie, bouleversements climatiques, préservation de la biodiversité,...). Notons que la Belgique aura l'honneur d'accueillir la séance de clôture le 1er décembre, à Bruxelles.

Le choix de 2011 marque aussi le centenaire du prix Nobel de chimie octroyé à Marie Curie pour sa découverte du radium et du polonium. Pour notre pays, c'est aussi le centenaire du premier des conseils Solvay organisés grâce au mécénat d'Ernest Solvay, chimiste et industriel belge. Paradoxalement, la participation de Marie Curie et sa notoriété sont intimement liées à ses activités sur la radioactivité couronnées par l'attribution conjointe avec Henri Becquerel et Pierre Curie du prix Nobel de physique en 1903. A l'époque déjà, les deux domaines physique et chimie étaient souvent imbriqués et cette situation est plus vive encore dans la recherche moderne, où les principes et découvertes de la chimie jouent un rôle important dans des applications largement pluridisciplinaires : nouveaux matériaux, instrumentation médicale, produits pharmaceutiques, stockage énergétique,...

Mais au fond, c'est quoi la chimie ?

Aux yeux du public, l'iconographie chimique se résume à quelques représentations classiques : le portrait du chimiste dans son laboratoire, des récipients remplis de solutions colorées, des tuyauteries et réservoirs industriels, des usines avec de nombreuses cheminées. Ces vues ont façonné une image très stéréotypée et réductrice d'une discipline pourtant très étendue dans ses contenus et ses applications.

Qui plus est, lors d'accidents ou de catastrophes, la presse se fait souvent l'écho dans ses gros titres de raccourcis, d'associations négatives. D'une science perçue positivement, la chimie devient progressivement après les années 1950 synonyme de pollutions, pesticides, toxicité, additifs malfaisants, explosifs et de substances allergènes, mutagènes ou cancérigènes, ... Certes, la chimie et son industrie ne sont nullement exemptes de reproches, et participent autant que l'utilisateur final à une société basée sur la consommation. Cependant, la chimie peut être bienfaisante (souvent alors sans faire la une des journaux) et à travers un prisme positif, elle peut être associée aux médicaments, aux matériaux innovants, à des procédés propres et durables, aux piles à combustibles, ...

Bien sûr, les chimistes ont leur part de responsabilité dans la perception de leur discipline, mais une explication est également à trouver dans sa difficulté de compréhension, qui nécessite une maîtrise à des niveaux différents, macroscopique, symbolique et submicroscopique, dont les difficultés vont en croissant. Le premier niveau, macroscopique, est celui du phénomène observable, tel un changement de coloration, une production de chaleur, un rayonnement émis lors d'une réaction, une dissolution, un dégagement gazeux. Le second niveau symbolique, celui des "représentations" fait appel à un apprentissage de nombreuses conventions d'écriture, de signes, symboles, mises en équation,... Finalement, le niveau submicroscopique n'est lui-même perçu qu'au travers de schémas, modèles, dessins et images de synthèse, outils tous conçus pour développer notre vision individuelle d'une réalité inobservable directement. C'est dans la superposition de ces niveaux que réside les barrières à l'apprentissage de la chimie, qui la rend difficile et malheureusement hermétique à de nombreuses personnes. D'où la grande difficulté rencontrée par les profanes d'appréhender les enjeux de la chimie, alors même qu'elle intervient dans de nombreuses applications de la vie courante. Améliorer cette situation est un des défis pour cette IYC2011 !

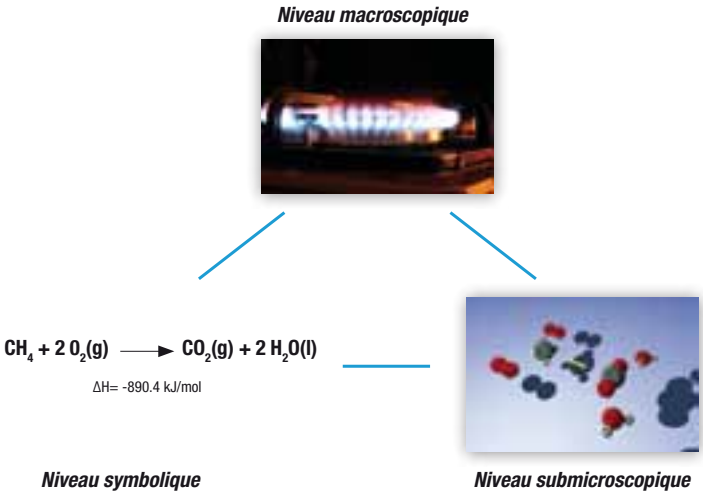


Schéma triangulaire des niveaux différents : macroscopique, symbolique et submicroscopique, illustrés par une vue macroscopique de la combustion du méthane, les équations chimiques correspondantes, et une visualisation modèle.

Références:
- http://www.chemistry2011.org/
- http://www.chimie2011.fr
- http://www.iupac.org/web/nt/2008-12-30_IYC
- http://www.chimie2011.be/
- *Nature* vol 469, 7328, 6 january 2011, p5
- http://www.aspo.be

La chimie à l'UMONS

Les études et grades académiques en chimie ont été développés en Belgique à la fin du 19e siècle. À Mons, cette discipline fut d'abord enseignée aux ingénieurs en Faculté Polytechnique. Plus tard, la création de la Faculté des Sciences a permis de réaliser la licence en chimie (diplôme requalifié en Master depuis quelques années à la suite de la réforme de Bologne).

Comme dans toutes les universités, l'enseignement de la chimie à Mons se nourrit d'activités de recherche fondamentale. A l'Université de Mons, cette recherche est portée par huit laboratoires qui rassemblent près de deux cents personnes (enseignants-chercheurs, mandataires FNRS, chercheurs post-doctoraux, doctorants et techniciens). Les thèmes de ces recherches sont très variés; ils s'étendent du domaine biomédical aux surfaces intelligentes et aux énergies renouvelables, mais tous sont directement liés à des problématiques essentielles pour nos sociétés modernes.

Ainsi, le laboratoire du Prof. Vanden Eynde conçoit et synthétise de nouvelles familles de molécules potentiellement actives dans la lutte contre les maladies parasitaires, en particulier le paludisme, tandis que le groupe du Prof. Blankert développe de nouvelles méthodes d'analyse (chromatographie, électrochimie,…) et de prédiction métabolique de (bio)molécules d'intérêt pharmaceutique. Les thèmes de recherche du Prof. Duez concernent la pharmacognosie par l'extraction, la purification, la séparation et la caractérisation de produits d'origine naturelle à visée thérapeutique. Le Prof. Muller et son équipe œuvrent quant à eux à la synthèse et l'étude des propriétés pharmacologiques des agents de contraste qui permettent aux techniques d'imagerie médicale d'être toujours plus précises. Les marqueurs développés sont validés au stade pré-clinique par la composante biomédicale de l'équipe et le CMMI (Center for Microscopy and Molecular Imaging), récemment créé par l'UMONS en collaboration avec l'ULB sur le Biopark de Gosselies.

Un autre domaine essentiel de la recherche à l'UMONS concerne la chimie des matériaux. Quatre laboratoires actifs dans ce domaine (les groupes des Profs. Damman, Dubois, Lazzaroni et Snyders) se sont fédérés pour former le Centre d'Innovation et de Recherche en MAtériaux Polymères (CIRMAP). Les activités du CIRMAP couvrent l'ensemble du cycle de vie d'un matériau polymère (un 'plastique' dans le langage courant): le point de départ est la conception de la structure chimique et la modélisation théorique des propriétés du matériau. L'étape suivante est sa synthèse contrôlée, par les méthodes de la chimie macromoléculaire ou par croissance sous vide sous forme de couche ultra-mince. Vient ensuite la mise en forme du matériau, en contrôlant finement sa microstructure et sa texture de surface, pour terminer par l'élaboration des stratégies de recyclage ou de biodégradation douce. Ainsi, les chercheurs œuvrent notamment à la mise au point de nouveaux matériaux composites plus légers, plus solides et résistants au feu, de surfaces de verre ou de métal auto-nettoyantes, et de cellules photovoltaïques souples et bon marché.

Enfin, le laboratoire du Prof. Olivier utilise des techniques électrochimiques de pointe pour étudier les phénomènes de corrosion (qui coûtent à nos pays développés plusieurs dizaines de milliards d'euros par an). Associés aux chercheurs du CIRMAP, les électrochimistes montois développent des solutions innovantes et respectueuses de l'environnement à ces problèmes de corrosion. Notons en outre que les aspects plus appliqués de ces travaux sur les matériaux sont développés conjointement avec le centre de recherche Materia Nova, en partenariat étroit avec des partenaires industriels, de la PME hainuyère à la grande multinationale de la chimie.

Comme tous les chercheurs d'aujourd'hui, les chimistes montois travaillent en interaction étroite avec de nombreux collègues, à la fois en Wallonie (grâce au financement des programmes de la Région wallonne, notamment dans le cadre des projets Biowin, Wagralim et Mecatech du Plan Marshall), en Flandre (avec le soutien de la Politique Scientifique Fédérale) et en Europe (dans des projets financés par la Commission Européenne).

Enfin, les chimistes montois sont conscients que la richesse de la chimie organique, ainsi que beaucoup d'applications biomédicales et dans le domaine des matériaux, reposent sur la disponibilité de la principale source de carbone : le pétrole. C'est pourquoi certains d'entre eux ont fondé il y a quelques années la branche belge de l'Association internationale pour l'Etude du Pic du Pétrole (ASPO), afin de définir comment nos sociétés modernes vont pouvoir s'adapter à la raréfaction, plus ou moins rapide mais inéluctable, de l'or noir.

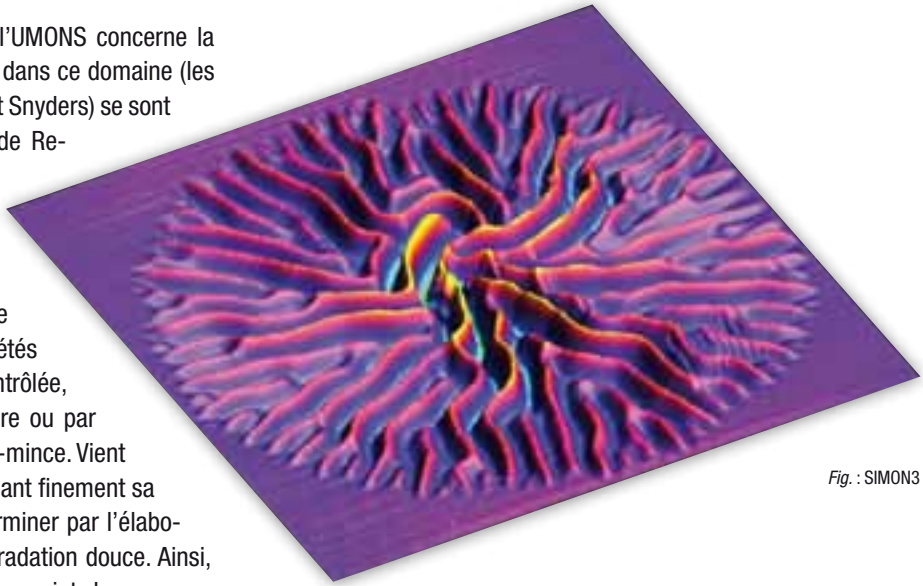


Fig. : SIMON3

L'Université de Mons se devait de célébrer l'Année internationale de la Chimie ! Son programme d'activités s'adresse tant aux étudiants qu'au grand public.

Le premier rendez-vous est bien entendu celui du Printemps des Sciences, qui aura lieu du 28 mars au 3 avril. Le thème choisi pour cette édition 2011 – *Matières et matériaux* – est particulièrement orienté vers la Chimie : ateliers, conférences, visites de laboratoires et même spectacles, sont prévus aux quatre coins de la Communauté française ; Mons et le Hainaut ne seront pas en reste !

Un peu plus tard dans l'année, à l'automne 2011, une exposition, réalisée par Michel Bougard, chimiste et Professeur d'Histoire des Sciences à l'UMONS, retracera la riche histoire de la Chimie au travers des magnifiques ouvrages de la Bibliothèque centrale !

En mai, c'est la Chimie d'aujourd'hui qui sera à l'honneur : les chimistes de l'UMONS et de Materia Nova participeront au grand week-end Portes ouvertes coordonné par Essenscia.

Mais l'un des temps forts de l'Année mondiale de la Chimie à l'UMONS sera assurément le cycle de grandes conférences qui s'étalera d'octobre à décembre.

C'est Michel Bougard, encore lui, qui ouvrira le bal avec une originale *conférence-théâtre*, intitulée *Quand la République n'avait pas besoin de savants… !*

Deuxième soirée, deuxième temps fort : si tout se déroule comme prévu, grâce aux collaborations entre les équipes montoises et américaines, nous devrions avoir le privilège d'accueillir Alan Heeger, Prix Nobel 2000de Chimie, pionnier des polymères conducteurs. Ces matériaux sont sur le point de révolutionner nos écrans, nos dispositifs d'éclairage et même peut-être les panneaux solaires de demain !

Pour la troisième soirée, nous accueillerons l'incontournable Brigitte Van Tiggelen, Historienne des Sciences à l'UCL, qui nous narrera l'extraordinaire épopée de Mendeleev et de son tableau périodique. Encore sous réserve la participation d'Hervé This, le pape de la gastronomie moléculaire, qui devrait nous régaler dans tous les sens du terme !

Nous terminerons le cycle en beauté avec un passionnant exposé sur la chimie de l'Amour, présenté par Marcel Hibert, pharmaco-chimiste de la Faculté de Pharmacie de Strasbourg… tout un programme !

Plus d'infos sur le site web du Carré des Sciences
http://cds.umons.ac.be. ■

Formations universitaires proposées par l'UMONS

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

A Mons

- Architecture (Bachelier et Master)

Faculté de Médecine et de Pharmacie

A Mons

- Médecine (Bachelier)
- Sciences biomédicales (Bachelier et Master)
- Sciences pharmaceutiques (Bachelier)
- Master complémentaire en Public Health Methodology

Faculté Polytechnique - Polytech Mons

A Mons

- Ingénieur civil (Bachelier)
- Ingénieur civil (Master)
  - → Architecte
  - → Chimie-Science des matériaux
  - → Electricien
  - → Informatique et gestion
  - → Mécanicien
  - → Mines et géologue

A Charleroi

- Bachelier Ingénieur civil (1ère année)
- Master Ingénieur civil en Informatique et Gestion - Stratégies décisionnelles en entreprises
- Master complémentaire en Gestion Totale de la Qualité

Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education

A Mons

- Sciences psychologiques et de l'éducation
  - → Orientation générale (Bachelier)
  - → Orientation logopédie (Bachelier)
- Sciences psychologiques (Master)
- Sciences de l'éducation (Master)
- Master complémentaire en Pédagogie universitaire et de l'Enseignement supérieur

A Charleroi

- Bachelier en Sciences psychologiques et de l'éducation
- Passerelles vers le Master en Sciences psychologiques et en sciences de l'éducation (année préparatoire)
- Master en Sciences de l'éducation

Faculté de Traduction et d'Interprétation - Ecole d'Interprètes Internationaux

A Mons

- Traduction et interprétation (Bachelier)
- Traduction (Master)
- Interprétation (Master)

Faculté des Sciences

A Mons

- Sciences :
  - → Biologiques (Bachelier et Master)
  - → Chimiques (Bachelier et Master)
  - → Informatiques (Bachelier et Master)
  - → Mathématiques (Bachelier et Master)
  - → Physiques (Bachelier et Master)
- Biochimie et biologie moléculaire et cellulaire (Master)
- Biologie des organismes et écologie (Master)

A Charleroi

- Master en Sciences informatiques (en collaboration avec l'ULB)

Faculté Warocqué d'Economie et de Gestion

A Mons

- Sciences économiques et de gestion (Bachelier)
- Politique économique et sociale (Master)
- Sciences de gestion (Bachelier et Master)
- Ingénieur de gestion (Bachelier et Master)

A Charleroi

- Bachelier en Sciences de gestion
- Master en Sciences de gestion

Institut des Sciences Humaines et Sociales

A Mons

- Sciences humaines et sociales (Bachelier)
  Options :
  - → Information - Communication
  - → Sciences politiques et sociales
  - → Sciences de gestion
  - → Psychologie et sciences de l'éducation

Institut des Sciences Juridiques

A Mons

- Droit (Bachelier)
  (en collaboration avec l'ULB)

Institut des Sciences du Langage

A Mons

- Master complémentaire Sciences du langage

Plus d'infos sur www.umons.ac.be

UMONS
Université de Mons